

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK TAHRİKLİ BİR BİNEK
OTOMOBİLİN TAHRİK SİSTEMİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU

Mustafa Umut KARAOĞLAN

Haziran, 2014

İZMİR

**ELEKTRİK TAHRİKLİ BİR BİNEK
OTOMOBİLİN TAHRİK SİSTEMİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon-İmalat Programı

Mustafa Umut KARAOĞLAN

Haziran, 2014


İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU


MUSTAFA UMUT KARAOĞLAN, tarafından PROF. DR. N. SEFA KURALAY yönetiminde hazırlanan “ELEKTRİK TAHRİKLİ BİR BİNEK OTOMOBİLİN TAHRİK SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. N. Sefa KURALAY

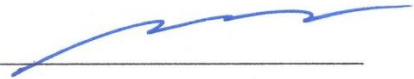
Yönetici


Prof. Dr. AYDOĞAN ÖZDAMAR

Jüri Üyesi


Yard. Doç. Dr. M. Murat TOPAÇ

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Ayşe OKUR
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Elektrik tahrikli bir binek otomobilin tahrik sisteminin matematiksel modellenmesi ve simülasyonu konusunda yaptığım yüksek lisans projemde desteğiyle her zaman yanımda olan değerli hocam Prof. Dr. N. Sefa KURALAY' a ve proje süresince çalışma ile ilgili her konuda desteğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. M. Murat TOPAÇ' a teşekkür ederim. Ayrıca programlama konusunda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Şahin YAVUZ' a teşekkür ederim.

Şimdiye kadarki öğrenim hayatımda veya dışında sürekli yanımda olan çok değerli anneme, babama ve kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.

Mustafa Umut KARAOĞLAN

ELEKTRİK TAHRİKLİ BİR BİNEK OTOMOBİLİN TAHRİK SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

ÖZ

Yurdumuzda ve dünyanın diğer ülkelerinde artan nüfus yoğunluğuna paralel olarak trafiğe çıkan araç sayısındaki artış, tüketilen yakıt miktarının ve atmosfere atılan kirletici gazların gittikçe artmasına yol açmıştır. Bu durum karşısında otomotiv endüstrisi, yakıt ekonomisini sağlamak ve kirletici emisyon miktarlarını azaltmak adına alternatif yakıtların ve daha verimli alternatif araçların geliştirilmesini gündeme getirmişlerdir. Bu çerçevede, yapılan araştırmaların odağında elektrik tahrik sisteminin kullanıldığı salt elektrikli veya hibrit elektrikli araçlar yer almıştır.

Bu tez kapsamında incelen elektrikli araçlarda, içten yanmalı motorun bulunmaması nedeniyle yüksek enerji verimi ve sıfır egzoz emisyonu sağlanmaktadır. Bununla birlikte, elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşmasının önündeki temel engel, taşıt üzerinde bulunan batarya ile doğrudan ilgili olan sürüş menzilinün düşük olması ve ilk yatırım maliyetidir. Bunun yanında, boşalan bataryanın tekrar doldurulması için gereken sürenin günümüz teknolojisi için fazla olması, diğer bir dezavantajdır. Bu sebeple, elektrikli araçların geliştirilmesinde teknolojinin istikameti batarya üzerine olacaktır. Bu inancın tezahürü olarak çalışmanın ikinci bölümünde, batarya ile ilgili detaya da girilmiştir.

Çalışmanın temelinde, tasarlanacak olan bir elektrikli araç için ihtiyaca uygun ve optimum yapı elemanlarının seçimi yapılarak taşıtın performans özellikleri belirlenmiştir. Tasarlanan araç, standart test çevrimlerine tabi tutularak, bir çevrim boyunca değişen temel özellikleri incelenmiştir. Teorik olarak elde edilen parametrelerle, uluslar arası literatürde geçerlilik kazanmış, hibrit ve elektrikli araçların analizinde yaygın olarak kullanılan ADVISOR programı kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak, aracın enerji sarfiyatı ve sürüş menzili belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç, elektrikli tahrik modeli, test çevrimi simülasyonu

MATHEMATICAL MODELING AND SIMULATION OF DRIVELINE SYSTEM OF AN ELECTRICAL PASSENGER CAR

ABSTRACT

In our country and the other countries of the world, increasing number of registered vehicles which parallel with the population density, caused increasing fuel consumption and pollutant gases discharged into atmosphere. Because of this situation, the automotive industries worked to improve alternative fuels for better fuel economy with reduce emissions and more efficient alternative vehicles. In this context, hybrid electric and battery electric vehicles which use electric propulsion systems located in the focus of researches.

Electric vehicles which examined in this thesis, have high energy efficiency and zero exhaust emissions due to they haven't got any internal combustion engines. However main obstacle to increase of electric vehicle usage is low driving range and high initial investment costs which directly related with battery. Additionally, much time requirement for recharges the empty battery, in these technology is disadvantage. For this reason the way of technology is among the battery development to improve electric vehicles. As a consequence of this belief, in the thesis' second chapter, the topic of battery detailed.

This study based on choosing optimum parameters according to the needs and performance characteristics of the vehicle are determined for designed electric vehicle. The vehicle that designed, analyzed with standard drive cycles and main properties are examined during the cycle. Theoretically acquired parameters compared with the results of ADVISOR program that commonly used for hybrid and electric vehicle analyze in international literature. Based on these results, energy consumption and driving range of vehicle are determined.

Keywords: Electric vehicle, electric propulsion model, drive cycle simulation

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi	1
1.2 Günümüz Elektrikli Araçları ve Özellikleri	2
1.3 Elektrikli Araçların Avantaj ve Dezavantajları	3
1.4 Elektrikli Araç Tahrik Sistemi ve Yapı Elemanları	4
1.4.1 Elektrik Motorları	6
1.4.2 Bataryalar.....	7
1.4.3 AC/DC Doğrultucular.....	9
1.4.4 DC/DC Çeviriciler	10
1.4.5 DC/AC Eviriciler (İnvertörler)	10
BÖLÜM İKİ - MATEMATİKSEL MODELLER	11
2.1 Modelleme Tanımı ve Türü.....	11
2.2 Taşıt Modeli	11
2.2.1 Yuvarlanma Direnci.....	12
2.2.2 Hava Direnci	13
2.2.3 Yokuş Direnci	15
2.2.4 İvmelenme Direnci	15
2.3 Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Taşıt Bataryaları.....	16
2.3.1 Batarya Performans ve Karakteristiklerine Ait Temel Terimler	16
2.3.2 Şarj Edilebilir Bataryaların Temel Çalışma Prensibi.....	18

2.3.3 Lityum İyon Batarya.....	19
2.3.4 Elektrikli Araçlarda Bataryanın Şarj Edilme Yöntemleri.....	21
2.4 Eşdeğer Batarya Modelleri.....	22
2.4.1 Elektrokimyasal Model.....	23
2.4.2 RC Modeli	24
2.4.3 Rint Modeli.....	25
2.4.4 Thevenin Batarya Modeli	27
2.4.5 PNGV Modeli.....	28
2.5 Elektrik Motoru Modeli.....	29
2.6 İntertör (Evirici) Modeli	31
BÖLÜM ÜÇ - TASARIM KRİTERLERİ VE TAŞIT PERFORMANS DEĞERLERİ.....	33
3.1 Temel Tasarım Kriterleri ve Motor Özellikleri.....	33
3.2 Sabit Çevrim Oranlı Dişli Diferansiyel Sisteminin Tasarımı.....	35
3.3 Taşıt Performans Özellikleri	43
3.3.1 Taşıt Performans Değerleri.....	45
3.4 Batarya Seçimi	47
BÖLÜM DÖRT - MODELİN ŞEHİR TEST ÇEVİRİMLERİNE GÖRE ANALİZİ.....	53
4.1 Şehir Test Çevrimleri	53
4.2 Taşıtın Çevrimlere Göre Analizi	55
4.2.1 Elektrik Motoru ve Batarya Gücünün Değişimi.....	59
4.2.2 Batarya Doluluk Oranı (SOC) ve Akımının Değişimi	61
4.3 Sonuçların Advisor ile Karşılaştırılması	64
4.4 Enerji Sarfiyatı ve Menzil Hesabı	68
BÖLÜM BEŞ - SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	74

KAYNAKLAR	76
EKLER.....	79

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 1897 Yılında Londra’da taksi olarak kullanılan elektrikli araç	1
Şekil 1.2 Elektrikli araç örnekleri	2
Şekil 1.3 Konsept elektrikli aracı tahrik sistemi	5
Şekil 1.4 Elektrikli araç güç dağılım mimarisi.....	6
Şekil 1.5 Kullanılan elektrik motorunun verim eğrisi.....	7
Şekil 1.6 Ragone diyagramı	9
Şekil 1.7 SOC Değişim aralığı	9
Şekil 2.1 Geri akışlı araç modeli.....	11
Şekil 2.2 Genel olarak araca etkiyen kuvvetler.....	12
Şekil 2.3 Serbest yuvarlanan tekerlekte yuvarlanma direncinin oluşumu	13
Şekil 2.4 Taşıtın projeksiyon alanı.....	14
Şekil 2.5 Bazı karoseri formlarının hava direnci katsayıları.....	14
Şekil 2.6 Yokuş tırmana araca etkiyen ağırlık bileşenleri.....	15
Şekil 2.7 Bataryanın temel çalışma prensibi	16
Şekil 2.8 Şarj durumunda NiMH ve Li-iyon bataryada meydana gelen reaksiyonlar	19
Şekil 2.9 RC Eşdeğer devre modeli şeması	24
Şekil 2.10 Rint eşdeğer devre modeli şeması.....	26
Şekil 2.11 Thevenin eşdeğer devre şeması	28
Şekil 2.12 PNGV Eşdeğer devre şeması	28
Şekil 2.13 Mıknatısları rotor eksenine içine (a) yerleştirilmiş ve mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş (b) sürekli mıknatıslı senkron motor	29
Şekil 2.14 d ve q Eksenlerinin belirlenmesi.....	30
Şekil 3.1 Yol tekerlek kuvvet bağıntısı, maksimum güç ve maksimum hız ile sınırlandırılmış ideal hareket gücü ve tahrik momenti karakteristik eğrileri	33
Şekil 3.2 Dişli diferansiyel grubu tasarım şeması	35
Şekil 3.3 Birinci mile etkiyen kuvvetler	37
Şekil 3.4 İkinci mile etkiyen kuvvetler	38
Şekil 3.5 Birinci mil	40

Şekil 3.6 İkinci mil.....	41
Şekil 3.7 1. ve 2. dişliler için gerilme analizi	42
Şekil 3.8 Sabit çevrim oranlı dişli kutusunun montaj görüntüsü	42
Şekil 3.9 Motor moment eğrisi ve kritik devir sayısı.....	43
Şekil 3.10 Motor eksenine indirgenmiş düz yol hareket direnci.....	44
Şekil 3.11 Farklı yokuş eğimleri için motor eksenine indirgenmiş hareket dirençleri	45
Şekil 3.12 Taşıtın ulaşabileceği maksimum ivme değeri.....	46
Şekil 3.13 Anlık ve sürekli elektrik motoru momenti.....	46
Şekil 3.14 Taşıtın 0-100 km/h hızlanma kabiliyeti	47
Şekil 3.15 10 Yıllık kullanıma bağlı araç giderleri	49
Şekil 3.16 Tübitak işbirliğiyle üretilmiş 11 hücreden oluşan batarya modülü (sağdaki) ve piyasada mevcut 5 hücreden oluşan lityum iyon batarya modülü	49
Şekil 3.17 Farklı batarya kapasiteleri için kütle ve hacim karşılaştırması.....	50
Şekil 3.18 Batarya yerleşimi için araç zeminindeki faydalı yer.....	51
Şekil 4.1 NEDC Test çevrimi	54
Şekil 4.2 FTP-72 Test çevrimi	54
Şekil 4.3 İstanbul şehir çevrimi.....	55
Şekil 4.4 Kullanılan elektrik motorunun veriminin değişimi.....	56
Şekil 4.5 Test çevrimlerinin seyir süresince ivme değişimleri	57
Şekil 4.6 NEDC (soldaki) ve FTP-72 (sağdaki) Test çevrimleri çalışma noktaları...	60
Şekil 4.7 NEDC, FTP-72 ve IDC Test çevrimleri gerekli batarya gücü.....	61
Şekil 4.8 Test çevrimleri boyunca SOC değişimi	62
Şekil 4.9 Lityum iyon bataryada hücre voltajı ve batarya iç direnci değişimi.....	63
Şekil 4.10 NEDC, FTP-72 ve IDC Test çevrimleri gerekli batarya akımı	64
Şekil 4.11 Advisor ekran görüntüsü-tasarım parametrelerinin girişi	65
Şekil 4.12 NEDC Test çevrimi için sonuç ekranı	66
Şekil 4.13 FTP-72 Test çevrimi için sonuç ekranı.....	66
Şekil 4.14 NEDC Test çevrimi SOC değişimi karşılaştırması.....	67
Şekil 4.15 FTP-72 Test çevrimi SOC değişimi karşılaştırması	67
Şekil 4.16 NEDC Test çevrimi batarya akımı değişimi karşılaştırması	67

Şekil 4.17 FTP-72 Test çevrimi batarya akımı değişimi karşılaştırması	68
Şekil 4.18 Test çevrimlerine göre enerji sarfiyatı ve menzil değerleri	69
Şekil 4.19 Araç menzilinın batarya kapasitesi ve araç ağırlığına göre değişimi	70
Şekil 4.20 Test çevrimlerine göre tahrik eden gücün zaman süresi diyagramı.....	70
Şekil 4.21 NEDC Test çevrimi için matlab sonuç ekranı	71
Şekil 4.22 FTP-72 Test çevrimi için matlab sonuç ekranı	72
Şekil 4.23 IDC Test çevrimi için matlab sonuç ekranı	73

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Mevcut elektrikli araçların tahrik sisteminin özellikleri.....	3
Tablo 2.1 Lityum iyon batarya çeşitlerine ait karakteristik özellikler	20
Tablo 2.2 Plug-in şarj etme seviyelerinin karakteristik özellikleri	22
Tablo 2.3 RC Batarya modeli devre elemanları.....	25
Tablo 3.1 Taşıt tasarımında esas alınan parametreler	34
Tablo 3.2 Batarya seçim parametreleri	48
Tablo 3.3 Farklı kapasitede bataryaların ağırlık ve hacimleri.....	50
Tablo 3.4 Seçilen bataryanın kapasitif özellikleri.....	51
Tablo 3.5 Seçilen bataryanın şarj ve deşarj durumu özellikleri.....	51

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Elektrikli Araçların Tarihsel Gelişimi

İlk elektrikli binek aracın tasarımı, 1830'lu yıllara dayanmaktadır. 1835 yılında ise, Christopher Becker tarafından ilk elektrikli aracın üretimi yapılmıştır. İlerleyen yıllarda Amerika'da elektrikli araçlara olan ilgi artmış ve 1897 yılında ilk ticari uygulama New York ve Londra'da taksi filosu olarak hayata geçmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 1897 Yılında Londra'da taksi olarak kullanılan elektrikli araç

1900'lü yılların başında elektrikli araçlara olan ilgi yüksek iken, 1920'li yıllara gelindiğinde, dünyada ve özellikle Amerikan piyasasında meydana gelen önemli gelişmeler, elektrikli araçlardan benzinli araçlara doğru bir yönelim olmasına yol açtı. Bu gelişmelerden en önemlisi, yeni petrol rezervlerinin bulunmasıyla beraber benzin fiyatının düşmesi ve yolların fiziki durumunun iyileşmesiyle beraber, uzun menzil ihtiyacının baş göstermesi olmuştur. Ayrıca, 1912'de marş motorunun icadı ile elle krank milini döndürerek ilk hareket verme gibi bir zorluk ortadan kalkmıştır. Bu sebeplerden dolayı, elektrikli araçların satış fiyatı benzinli araçların satış fiyatının üzerinde kalmış ve 1935'li yıllara gelindiğinde ise piyasadan tamamen silinmiştir.

1973'de meydana gelen petrol krizi, elektrikli araçların yeniden hatırlanmasına vesile olmuş, 1990'lı yıllara kadar az da olsa elektrikli araç üretimi olmuştur. 1990'dan sonra çevre bilincinin artması ve getirilen yasal düzenlemeler nedeniyle,

elektrikli araç sektörü ivme kazanmıştır. Günümüzde ise, bunun sonucu olarak, birçok markanın elektrikli araç modellerini görmek mümkün hale gelmiştir (Sayın ve Yüksel, 2011).

1.2 Günümüz Elektrikli Araçları ve Özellikleri

Günümüzde, gelişmiş uluslararası firmaların elektrikli araç sektöründe seri üretim araçları bulunmakta ve bu konuda çalışmaları hızla devam etmektedir. Bunlara örnek olarak Ford Focus, Nissan Leaf, Toyota Rav 4 ve Renault Fluence elektrikli araç modelleri gösterilebilir ve bu araçlar genellikle şehir içi kullanıma uygun olarak tasarlanıp önden çekişli olarak üretilmektedir. Bu özelliklere istisna olan tek elektrikli araç Tesla Roadstar aracı olup spor araç konseptinde ve arkadan itişli olarak üretilmektedir (Şekil 1.2).



Ford Focus



Toyota Rav 4



Nissan Leaf



Renault Fluence



Tesla Roadstar 2.5

Şekil 1.2 Elektrikli araç örnekleri

Elektrikli araçların belki de en dikkat çekicisi olan Tesla aracı, 215 kW gücünde ve 400 Nm moment verme kapasiteli AC indüksiyon (asen kron) motora sahiptir. Elektrik motoru çıkışında 8,27:1 çevrim oranlı tek basamaklı bir dişli kutusuna sahip araç 53 kWh batarya kapasitesi ile 300 km'den fazla menzile sahip olup elektrikli araçlar içerisinde en yüksek menzile sahip araçtır.

Fakat bu tez kapsamında tasarlanan araç şehiriçi kullanımına yönelik olduğu için özellikleri mukayese edebilmek adına piyasadaki Ford, Toyota, Nissan ve Renault markaların elektrikli araç modellerinin özelliklerine göz atmak faydalı olacaktır. Hepsi önden çekişli ve tek kademe dişli kutusuna sahip bu araçlara ait özellikler aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 1.1 Mevcut elektrikli araçların tahrik sistemi özellikleri

Özellikler	Ford Focus	Toyota Rav 4	Renault Fluence	Nissan Leaf
Elektrik Motoru	AC Senkron	AC Asenkron	AC Senkron	AC Senkron
Motor Gücü (kW)	107	115	70	80
Motor Momenti (Nm)	249	370	226	280
Batarya Tipi	Lityum İyon	NiMH	Lityum İyon	Lityum İyon
Batarya Kapasitesi (kWh)	23	27,4	25	24

1.3 Elektrikli Araçların Avantaj ve Dezavantajları

Elektrikli araçlarda, aracın tahriki elektrik motoru tarafından sağlanmaktadır. Elektrik motoru ise gücünü araç üzerindeki mevcut enerji depolama sisteminden almaktadır. Bu enerji depolama sistemleri bataryalardan veya süper kapasitörlerden meydana gelmektedir. Herhangi yakıtın yanması elektrikli araç sistemlerinde söz konusu olmadığı için herhangi bir kirletici emisyon meydana gelmez. Çevre bilinci ve çeşitli çevre protokollerin gittikçe ciddileştiği göz önüne alındığı takdirde, elektrikli araçların bu avantajının önemi görülmektedir.

Gürültü açısından değerlendirildiğinde elektrik motoru içten yanmalı motora göre daha sessiz çalışmakta olup bu yönden belirgin bir avantaja sahiptir. Ayrıca elektrik motoru jeneratör gibi çalışabilme özelliğine sahip olup aracın frenlenmesi durumunda bataryayı şarj edebilmektedir. Yakıt (enerji) ve bakım maliyetleri bakımından içten yanmalı motorlara göre avantajlı durumdadır.

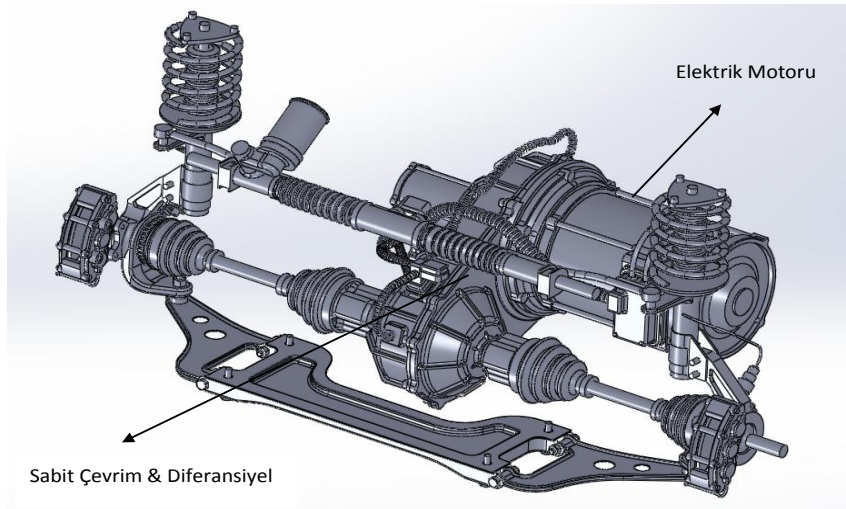
Elektrikli araçların en büyük dezavantajı ise batarya maliyetinden dolayı satın alma maliyetinin yüksek olmasıdır. Piyasa satış fiyatına batarya maliyetinin (yaklaşık 500 Euro/kWh) de eklenmesiyle birlikte elektrikli araçlar aynı özellikteki konvansiyonel araçlara göre daha pahalı olmaktadır. Bununla birlikte diğer bir

dezavantajı menzilinın konvansiyonel araçlara göre düşük olmasıdır. Aynı şekilde şarj edilebilir bataryanın doldurulma süresi de konvansiyonel araçların yakıt tankının doldurulma süresine göre oldukça yüksektir. Konvansiyonel araçlar birkaç dakikada depolarını doldurabilmelerine karşın elektrikli araçların bataryasının tamamen doldurulması 7-8 saati bulabilmektedir. Batarya teknolojisine bağlı olan bu dezavantajın, teknolojinin gelişmesiyle birlikte kaybolacağı düşünülmektedir.

İşletme stratejisi olarak bakıldığında ülkemizde elektrikli araçlar için şarj ve servis istasyonlarının sayısı yeterli değildir. Elektrikli araçların yaygınlaşmasına paralel olarak elektrikli araç sanayisinde çalışan eleman ve servis sayısının artması gerekmektedir.

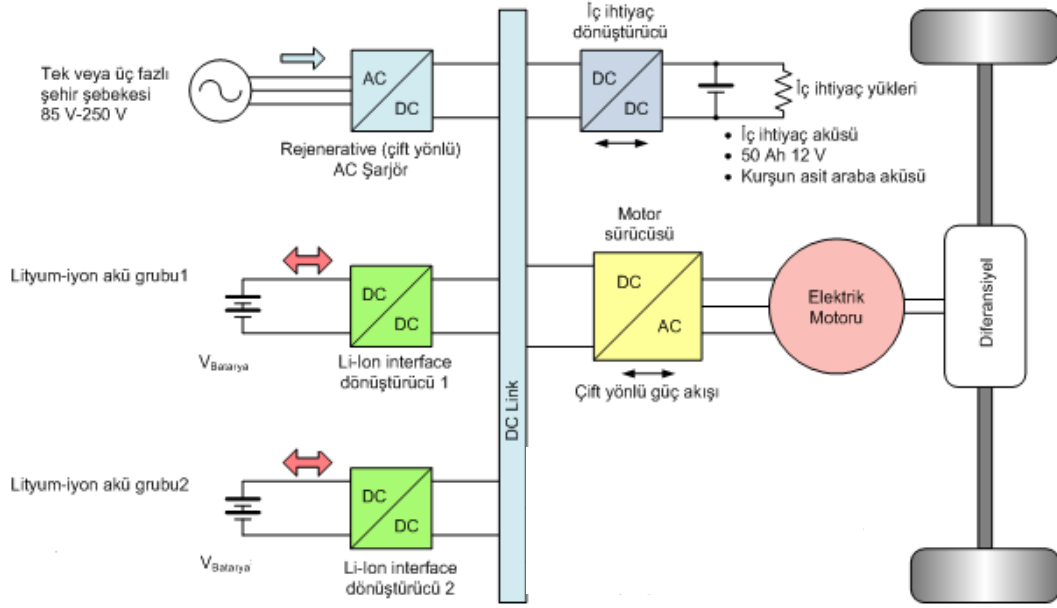
1.4 Elektrikli Araç Tahrik Sistemi ve Yapı Elemanları

Tez kapsamında incelenen önden tahrikli şarj edilebilir elektrikli Konsept (Şekil 1.3) aracında temel tahrik sistemi olarak sürekli mıknatıslı senkron elektrik motoru ve motorun hemen çıkışında sabit çevrim oranlı bir redüktör dişli mekanizması ve diferansiyel ikilisi bulunmaktadır. Elektrik motorlarının devir-moment karakteristiği göz önüne alındığında bu tasarımda herhangi bir vites kutusu koymaya gerek yoktur. Diferansiyelden alınan tahrikin, homokinetik mafsallı miller ile tekerleklere iletimi gerçekleşecektir.



Şekil 1.3 Konsept elektrikli aracı tahrik sistemi

Elektrikli araçların tahrik sisteminde temel tahrik elemanlarının dışında güç elektroniği elemanları da büyük önem arz eder. Tasarlanan elektrikli aracın tahrik sisteminin mimarisi aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 1.4). Burada da görüldüğü gibi batarya ve elektrik motoru-redüktör grubundan başka, kullanılan AC/DC doğrultucu, DC/DC dönüştürücüler (çevirici) ve DC/AC invertör, elektrikli araç sisteminin tamamlayıcısıdır.



Şekil 1.4 Elektrikli araç güç dağılım mimarisi

Bu sistemde bataryalar voltaj değerlerini yüksek tutmamak adına ve hücre dengelemesine kolaylık sağlaması için birbirine paralel iki paket şeklinde tasarlanmıştır. Ayrıca rejeneratif enerjiyi depo edebilen ve yüksek bir ivmelenme için gerektiğinde yardımcı güç kaynağı olarak kullanılan bir ultrakapasitör de sistemde bulunabilmektedir. Bu kapasitörün sistemdeki varlığı zorunlu bir durum olmayıp, hızlı bir şekilde ihtiyaca cevap vermesi ve bu gibi durumlarda bataryanın hücre dengelemesine daha az ihtiyaç duyması sağlanarak batarya ömrünün artırılması amaçlanmıştır. Araçta yüksek gerilim bataryasına ilaveten bir adet de düşük gerilim bataryası iç ihtiyaç aküsü olarak bulunmaktadır. Bunun temel sebebi araçtaki elektrik ihtiyacının (silecek motoru, ayna motoru, lambalar vb.) yüksek batarya geriliminde çalışır şekilde olmasından kaynaklanan ek maliyeti bertaraf etmek ve yüksek gerilime temas sonucu oluşacak kazaları önlemektir.

1.4.1 Elektrik Motorları

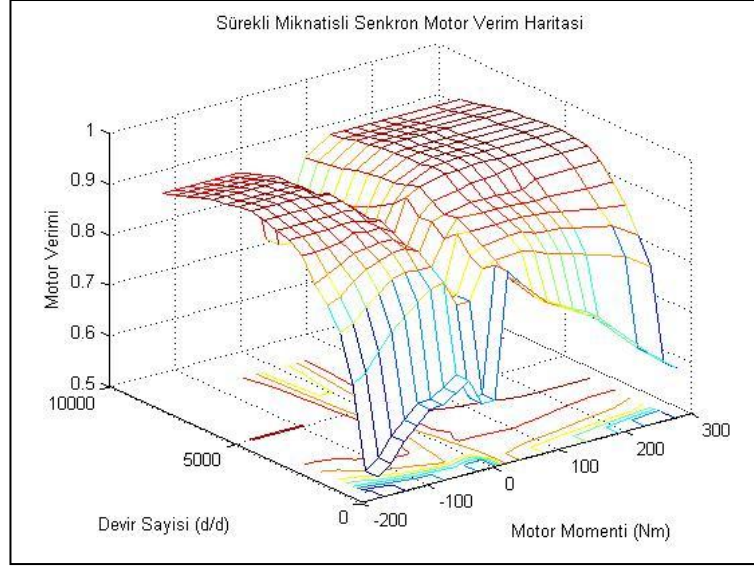
Elektrikli araçlarda bulunan ilk elektromanyetik enerji dönüştürücüsü olup elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Elektrikle tahrik, içten yanmalı motorlarla tahrike göre çok yüksek verim, yüksek devir sayıları, güç başına düşen özgül ağırlık, çevre dostu olması ve güvenilirlik bakımından avantajlı durumdadır. Elektrikli araç tahrik sistemlerinde temel olarak dört elektrik motoru kullanılmaktadır. Bunlar doğru akım (DC) motorlar, asenkron motorlar (ASM), sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) ve nadir olarak da anahtarlı relüktans motorlardır (ARM).

Geçmişte sıkça tercih edilmesine karşın DC motorlar günümüzde yerlerini AC motorlara bırakmışlardır. Doğru akım motorları genel olarak elektromotorun hareketsiz kısmını oluşturan ve aynı zamanda stator sargıları için saf demir nüveyi oluşturan stator, motorun dönen kısmını oluşturan rotor ve akım yönünü değiştiren komütatör tarafından oluşur. Doğru akım motorlarında indüksiyon sayesinde stator ve rotordaki manyetik alanlar indüklenir ve komütatör sayesinde de bu manyetik alanlar birbirini iterek dönme hareketi elde edilir. Günümüzde bakım zorluğu ve düşük güç yoğunluğu (300 W/kg) gibi nedenlerden dolayı tercih edilmemektedir.

Asenkron motorlarda ise statorun bir alternatif akıma bağlanmasıyla bir döner alan elde edilir. Bu döner alan rotorda bir endüksiyon akımına sebep olan bir gerilim indükler. Rotor akımı tarafından yeniden oluşturulan manyetik alan statordaki manyetik alan tarafından sürüklenerek rotor dönmeye başlar. Yüksek güç yoğunluğu (750 W/kg) ve kolay bakım avantajına sahip bu motorların elektronik maliyeti yüksektir.

Elektrikli araçlarda en sık tercih edilen motorlardan biri olan sürekli mıknatıslı senkron motorda manyetik alan yaratmak için uyarma sargılarının yerine mıknatıs kullanılmaktadır. Böylece rotor bakır kayıpları ve uyarma devresi bakım gereksinimi bertaraf edilmiştir. Maliyeti yüksek olmasına karşın yüksek verimi, yüksek güç ve moment yoğunluğu bakımından rakiplerinden bir adım öndedir. Bu tez kapsamında da tasarlanan elektrikli araç için sürekli mıknatıslı senkron motor kullanılması

öngörülmüştür. Bu motorlara ait aynı zamanda tez kapsamında da baz alınmış motor verim eğrisi aşağıdaki gibidir.



Şekil 1.5 Kullanılan elektrik motorunun verim eğrisi

1.4.2 Bataryalar

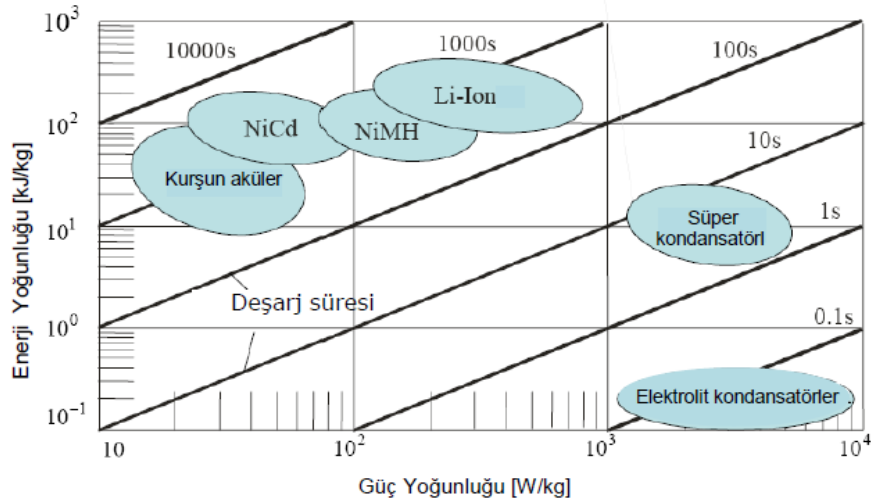
Hibrit elektrikli ve salt elektrikli araçlarda batarya seçiminde maliyet, performans, ağırlık, güvenilirlik ve ömür gibi faktörlere dikkat edilmelidir. Konvansiyonel araçlarda kurşun asit bataryalar yeterli olurken, araç tahrik gücünün sağlanması söz konusu olduğunda daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar gerekmektedir. Bu durumda günümüzde elektrikli ve hibrit araçlarda genellikle NiMH ve lityum iyon bataryalardır (Sayın ve Yüksel, 2011). Bunun dışında kurşun asit, nikel kadmiyum (Ni-Cd) ve çinko hava bataryalar da kullanılmaktadır.

Elektrikli ve Hibrit araçlarda bataryalar, ihtiyaç duyulan enerji miktarına göre boyutlandırılırlar. Elektrik motorunun yanında içten yanmalı motorun da bulunduğu hibrit araçlarda bataryanın, aracın ivmelenmesine destek olma amacı taşıdığı durumlarda yüksek kapasitede olması gerekmez. Bu durumda ağırlık ve maliyet bakımında çok fazla bir yük getirmesi söz konusu değildir. Elektrikli araçlarda ise tek tahrik kaynağı elektrik motoru olduğu için taşıtın menzilini yüksek tutabilme adına bataryanın kapasitesinin yüksek olması gerekmektedir.

NiMH batarya teknolojisi lityum iyon batarya teknolojisine göre daha eski olduğu ve NiMH bataryanın kurşun asit bataryaya göre yüksek enerji yoğunluğuna sahip

olması çoğu hibrit ve elektrikli araçlarda en çok kullanılan batarya tipi olmasına olanak tanımıştır.

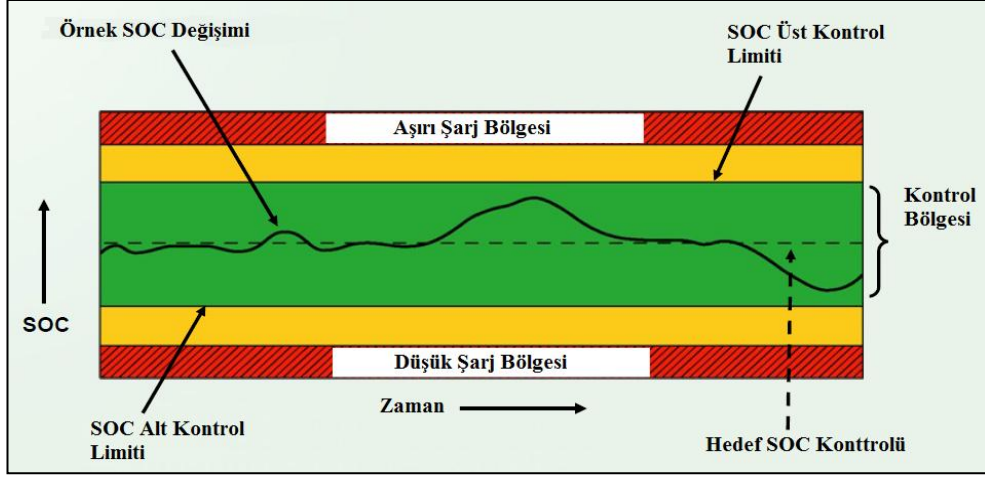
Son yıllarda yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum iyon batarya teknolojisinin gelişmesi ile hibrit ve elektrikli araçlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Önceki yıllarda güvenlik zaafları ile birlikte batarya kapasitesinin sıcaklığın değişmesi ile düşmesi gibi nedenlerden dolayı daha çok küçük elektronik cihazlarda kullanılmıştır. Lityum iyon batarya teknolojisinin gelişmesi ile birlikte yüksek enerji yoğunluğuna sahip bu bataryalar hibrit ve elektrikli araçlar için en uygun seçenek haline gelmiştir (Şekil 1.6) (Sayın ve Yüksel, 2011).Çeşitli bataryalar için enerji yoğunluğu – güç yoğunluğu kıyaslamasını gösteren ragone diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Ragone diyagramı

Bataryanın çalışma koşulları sıcaklık ve SOC durumuna göre değişiklik göstermektedir. Sıcaklık arttıkça bataryadaki kimyasal reaksiyonlar artacağı için sıcaklık artışı bataryanın performansını artırıcı yönde etki ederek şarj ve deşarj verimini artırır. Fakat bununla beraber istenmeyen reaksiyonların da artması sonucu pil ömründe azalma meydana gelir. SOC durumunun artması ise bataryanın hücre voltajını artırıcı yönde etkide bulunur. SOC'nin aşırı azaldığı durumlarda batarya iç direnci çok yüksek seviyelere gelmesine karşın yaklaşık %20 SOC'den sonra fazla miktarda değişim gözlenmez. Bu sebeple eğer deşarj işlemi tam yapılmayıp kısmi olarak gerçekleştirilirse daha uzun çevrim ömrü elde edilebilir. Bölüm dörtte batarya iç direncinin ve hücre voltajının SOC yüzdesine göre lityum iyon bataryalardaki değişimi gösterilmiştir. Ayrıca lityum iyon gibi bazı batarya sistemlerinde, şarj akım

seviyesinin sınırlandırılması çevrim ömrünün uzamasına yol açar. Diğer bir ifade ile bu tür bataryalarda tam şarj yerine kısmi şarj yapılması daha avantajlıdır.



Şekil 1.7 SOC Değişim aralığı

Genelde hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılan bataryalarda belirli bir SOC aralığı mevcuttur. Araçlarda SOC aralığı kontrol sistemleri ile SOC durumunun elektrikli araçlarda alt limit %10-%20 ve üst limit %80-%90 aralığında seyretmesi tercih edilir.

1.4.3 AC/DC Doğrultucular

Doğrultucular alternatif akımın doğru akıma dönüştürülmesi maksadıyla kullanılırlar. Şarj edilebilir elektrikli araçlarda tek veya üç fazlı şehir şebekesinden alınan gerilimin, DC gerilim kaynağı olan bataryaya verilebilmesi için doğrultularak DC baraya verilmesi gerekmektedir. Bara geriliminin DC olmasının sebebi ise elektronik devrelerde senkronizasyon sorunu yaşanmaması, kontrol kolaylığı ve verimin artırılmasıdır. Doğrultucular, kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Çıkış gerilimi değiştirilebilir (kontrollü) doğrultucular kullanılması halinde DC baraya bağlı olan bataryanın şarj ve deşarjı için DC/DC çevirici kullanmaya gerek duyulmaz. Bu uygulamada kullanılan doğrultucuda olduğu gibi kontrolsüz bir doğrultucu kullanılması durumunda ise bataryanın şarjı için DC/DC çeviriciye gerek vardır.

1.4.4 DC/DC Çeviriciler

DC/DC çeviriciler, kontrolsüz doğrultucu ile sağlanan regüle edilmemiş DC gerilimin sabit DC gerilime dönüştürülmesi için kullanılırlar. Batarya grubu çıkışında kullanılacak çeviriciler, standart çeviricilerden farklı olarak, çeşitli yol koşullarında sistemi beslemek ve uygun durumda sistemi şarj edebilmek için çift yönlü güç akışı sağlamalıdır. Elektrikli araçlarda fren enerjisinin geri kazanımı ve dolayısıyla aracın menzilin arttırılması için çok önemlidir.

1.4.5 DC/AC Çeviriciler (İnvertörler)

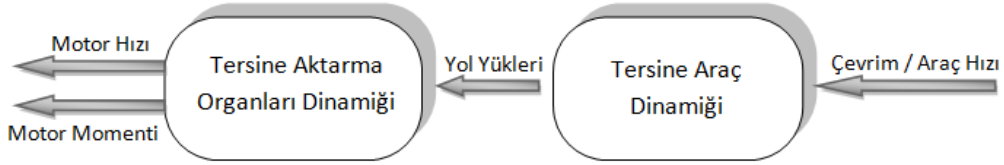
İnvertörler, doğru akım enerji kaynağında hazır tutulan doğru akımı, elektromotorun kumanda edebilmesi için frekans ve salınımı ayarlanabilen alternatif akıma dönüştürür. Elektrikli taşıtların tahrik sistemlerinde üç fazlı gerilim beslemeli PWM (darbe genişlik modülasyonu) invertörler asenkron, sürekli mıknatıslı motor kontrollerinde kullanılırlar. Anahtarlama elemanı olarak MOSFET (metal-oxide semiconductor field effect transistor) ve IGBT (insulated gate bipolar transistor) olarak iki tip invertör kullanılmaktadır.

BÖLÜM İKİ

MATEMATİKSEL MODELLER

2.1 Modelleme Tanımı ve Türü

Elektrikli aracın modellenmesi ile tasarımı yapılacak olan araca ait bazı performans değerlerinin hesaplanması ve standart şehir çevrimlerine göre simülasyonunun yapılarak batarya ve elektrik motorunun dinamik hareketlerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle taşıta ait boyuna araç modeli kurularak güç ve aktarma organlarının davranışları hesaplanabilir. Boyuna araç modeli, geri akış yöntemine göre (Şekil 2.1) hız profili belirtilerek, bu hız profiline karşılık gelen araç yüklerini tekerlekten bataryaya kadar hesaplamak suretiyle gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.1 Geri akışlı araç modeli

Geri akış modelinde, ileri akış modelindeki gibi güç sistemlerini kumanda eden bir sürücü modeli bulunmadığı için daha basit ve optimizasyon çalışmaları için daha uygundur. Burada belirtilen hız profilleri için ileriki kısımlarda standart test çevrimleri kullanılacaktır.

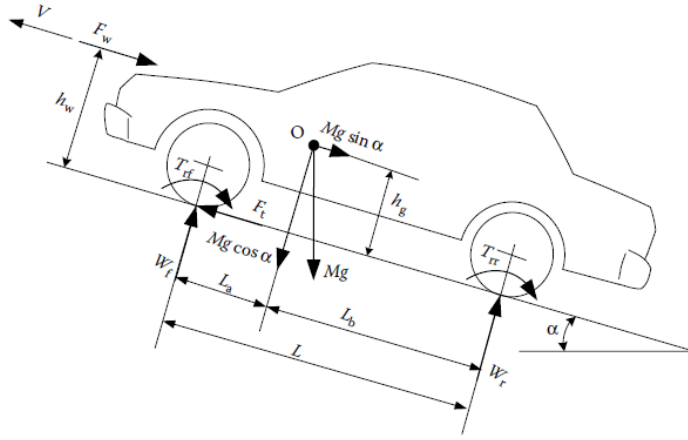
2.2 Taşıt Modeli

Bir aracın hareketi sırasında motor gücü tarafından aşılması gereken seyir dirençleri ortaya çıkar. Dirençlerin toplamı, aracın ileri doğru hareketi için motordan tahrik tekerleklerine iletilmesi gereken kuvveti belirler. Hareket dirençleri ve tahrik güçlerinin birlikte etkimesinden bir aracın

- hareket güçleri,
- en yüksek hızı,
- yokuş tırmanma kabiliyeti ve

- ivmelenme yeteneği türetilir.

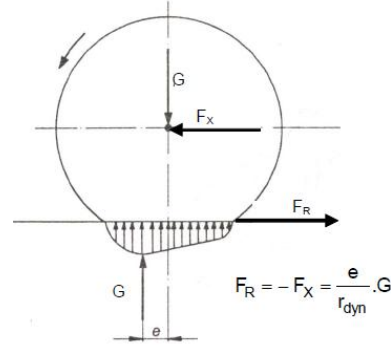
Aracın hareketinin sürekliliği için motor, hareket dirençleri ve tahrik sistemindeki kayıpları aşabilmek için belirli bir gücü üretmek zorundadır. Düz yoldaki seyir durumunda hareket dirençleri yuvarlanma (F_R) ve hava dirençlerinden (F_L) oluşmaktadır; yokuşta ilave olarak yokuş direnci (F_{st}) ve ivmelenme durumunda da ivme direnci (F_B) etkimektedir.



Şekil 2.2 Genel olarak araca etki eden kuvvetler

2.2.1 Yuvarlanma Direnci

Yuvarlanma direnci tekerleğinin yuvarlanma sırasında yol ve lastiklerdeki şekil değiştirmelerden kaynaklanır. Sert zeminlerdeki yuvarlanma direncinin ana kaynağı yuvarlanma sırasında lastiğin karkas yapısındaki şekil değiştirmeden dolayı ortaya çıkan histerezislerdir. Lastik sert zemin üzerinde yuvarlanmaya başladığı zaman lastiğin karkas yapısı yer ile temas ettiği alanda şekil değiştirir. Bu şekil değiştirmenin sonucu lastiğin hareket yönündeki normal basınç diğer taraftaki basınçtan yüksek olur. Yani normal basınç merkezi lastik ekseninden hareket yönüne doğru bir miktar kayar.



Şekil 2.3 Serbest yuvarlanan tekerlekte yuvarlanma direncinin oluşumu

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere serbest yuvarlanan tekerlekteki moment dengesinden yuvarlanma direnci aşağıdaki gibi elde edilebilir. Bu eşitlikte f_R değerine yuvarlanma direnci katsayısı denir.

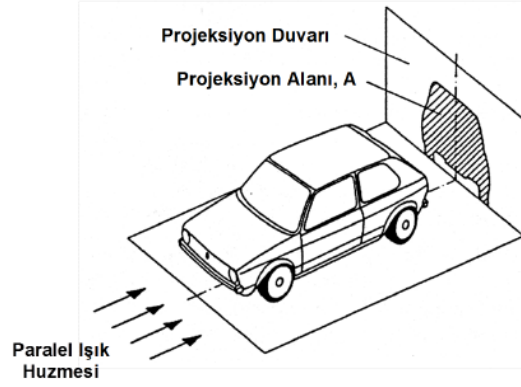
$$F_R = \left(\frac{e}{r_{dyn}} \right) \cdot G = f_R \cdot G \quad (2.1)$$

2.2.2 Hava Direnci

Akışkan içerisinde hareket eden cisimlere hareketlerini engelleyici yönde kuvvetler etkir. Havanın akışkan olarak kabul edilmesi durumunda, durgun hava içerisinde v hızı ile hareket eden araca hareket yönünün tersi istikamette bir direnç kuvveti, hava direnci kuvveti F_L etkir.

Bu kuvvet aracın çevresinden akan havanın dinamik basıncına (ρ_L), aracın hareket yönüne dik kesit alanına (A) ve aracın aerodinamik yapısına (C_w) bağlıdır.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot C_w \cdot V^2 \quad (2.2)$$

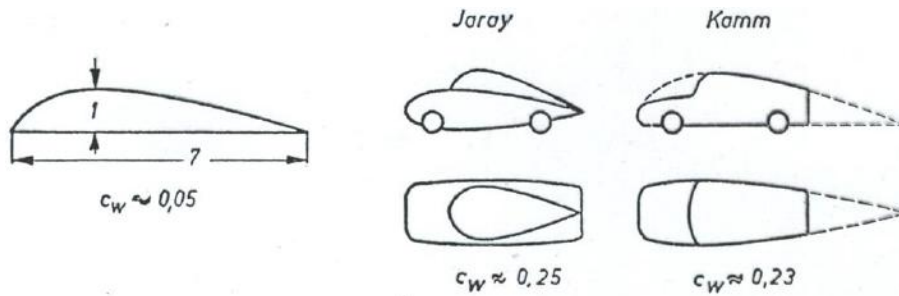


Şekil 2.4 Taşıtın projeksiyon alanı

C_w hava direnci katsayısı aracın aerodinamik formuna bağlıdır. C_w değeri aerodinamik ilişkilerin karmaşık olması nedeniyle hesaplama yöntemiyle belirlenmez, rüzgar tüneline ölçülür. A aracın hareket yönüne iz düşüm alanıdır (Alın yüzeyi olarak da ifade edilir). ρ_L hava yoğunluğu olup $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta hava yoğunluğu $\rho_L = 1,22\text{ kg/m}^3$ alınabilir.

Araca etkiyen hava direnci araç bileşke hareket hızının karesi ile ilişkide olması nedeniyle hızın artmasıyla birlikte tahrik gücünün büyük bir kısmı hava direnci yenmek için harcanmaktadır. Hava direncinin en aza indirilmesi için yukarıdaki eşitliğe göre aracın iz düşüm alanının (A) azaltılması gerekir. Bu araç kabin genişliği ve ergonomik konfor kriterlerine bağlı olduğu için fazla bir küçültme yapılamaz. Bu durumda elde değiştirilebilecek tek seçenek aracın hava direnci katsayısı C_w değerinin düşürülmesidir.

Hava direnci katsayısı en düşük olan kanat formuna uygun olarak; araçların ve özellikle spor tipi araçların hava direnci katsayısını azaltmak için, karoseri formu damla formuna benzetilmektedir. Burada en tanınmış iki model “Jaray” ve günümüz araç karoseri formuna yön veren “Kamm” formu öne çıkmaktadır.

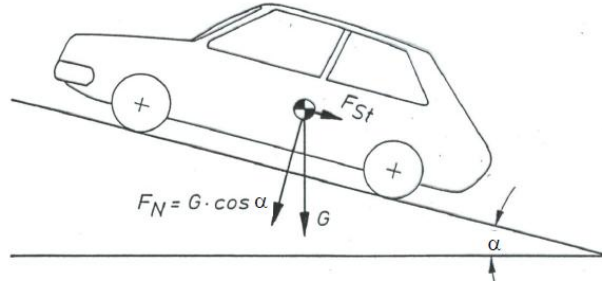


Şekil 2.5 Bazı karoseri formlarının hava direnci katsayıları

Ancak bir kanat profili etrafından akan havanın kanadın üst kısmında sıkışmasıyla dinamik basıncın arttığı statik basıncın kanat tabanına göre düştüğü ve bu statik basınç farkından dolayı kanada bir kaldırma kuvveti etkidiği bilinmektedir. Bu kaldırma kuvveti aks yüklerinin azalmasına yol açmaktadır. Aks yüklerinin azalması yol-tekerlek arası kuvvet iletim kapasite sınırının azalmasına neden olduğu için istenmeyen bir durumdur. Aracın aerodinamik formu nedeniyle oluşan bu kaldırma kuvvetini yok etmek veya tersine döndürmek için aracın özellikle yarış araçlarında ön veya arka aks kısımların üzerine ters kanat profili biçiminde hava yönlendiriciler (spoiller) monte edilir.

2.2.3 Yokuş Direnci

Yokuş direnci, taşıtın eğimli yolda hareketi sırasında taşıtın ağırlığının yola paralel bileşeninden kaynaklanır. Eğimli yolda taşıt üzerindeki bu ağırlık bileşenleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Yokuş tırmanan araca etkiyen ağırlık bileşenleri

Araç ağırlığının yola paralel bileşeni $G \cdot \sin \alpha$ aynı zamanda taşıta etkiyen yokuş direncidir.

2.2.4 İvmelenme Direnci

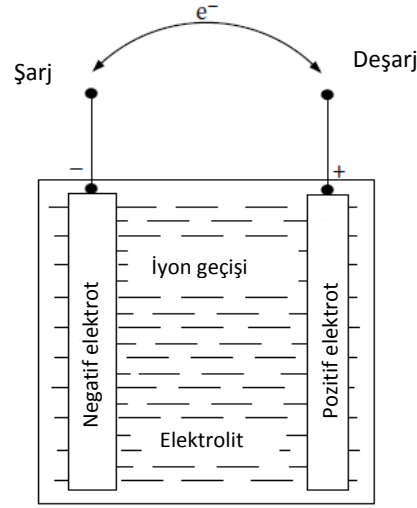
İvmelenme direnci F_B bir aracın ivmelenmesi sırasında aşılması gereken bir dirençtir. Dönen ve öteleme yapan kütlelerin ivmelenmesi için gerekli kuvvetlerden oluşur:

$$F_B = m \cdot \ddot{x} + \frac{\sum \theta_i \cdot w_R}{r_{dyn}} \quad (2.3)$$

Burada m aracın kütlesi, \ddot{x} öteleme ivmesini, θ_i tahrik sistemindeki dönen kütlelerin tekerlek eksenine indirgenmiş kütle atalet momenti, \dot{w}_R tekerlek açısall ivmesi ve r_{dyn} tekerlek dinamik yarıçapıdır.

2.3 Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Taşıtların Bataryaları

Bataryalar elektrokimyasal enerji depolayıcılarıdır. Kimyasal madde dönüşümü sayesinde enerji depolanır ve reaksiyonun geri dönüşü ile tekrar geri verilir. Bir batarya, anot ve katot olmak üzere iki elektrottan ve elektrotlar arasındaki bir elektrolitten oluşmaktadır (Kuralay, 2013).



Şekil 2.7 Bataryanın temel çalışma prensibi

Elektrikli araçlarda, tasarlanan aracın karakteristiğini belirleyen en önemli faktörlerden birisi bataryadır. Özellikle menzil üzerine yapılan çalışmalarda, batarya şarjı, şarj derinliği ve batarya ömrü önemli rol oynar (Boyalı, 2008).

2.3.1 Batarya Performans ve Karakteristiklerine Ait Temel Terimler

Literatürde bataryanın performansını karakterize eden çeşitli terimler kullanılmaktadır. Bunlardan sıkça kullanılan terimler:

Hücre, Modül ve Paket : Tek bir batarya hücresi elektrolit, seperatör ve elektrotlardan oluşan bataryanın en küçük birimidir. Birkaç hücrenin fiziksel olarak bağlanması yada kaynakla birleştirilmesi ile modül meydana gelmektedir. Bataryanın

termal yönetimi için tek bir yerde topluca bulunan modüller ise paketi oluşturmaktadır. Bir elektrikli araçta, aracın çeşitli yerlerinde bulunan birden fazla batarya paketi bulunabilmektedir.

Amper-saat Kapasite : Bataryanın belirli şartlar altında tam dolu şarj durumundan boş durumuna kadar olan toplam şarj kapasitesidir. Anma Ah kapasite, belirtilen koşullardaki tam dolu yeni bataryanın nominal kapasitesidir.

Ayrıca batarya kapasitesi kWh yada Wh olarak da gösterilebilir. Anma Wh kapasitesi;

$$\text{Anma Wh Kapasitesi} = \text{Anma Ah Kapasite} \times \text{Anma Batarya Voltajı}$$

C oranı : Bataryanın bir saatteki kapasitesine eşit şarj veya deşarj oranını temsil eder. Örneğin 1,6 Ah bataryada, 1 C'lik durum için bataryanın 1,6 A şarj yada deşarjına oda sıcaklığında 1 saat sürmektedir. Aynı şekilde 0,1 C, 0,16 A ve 2 C de bataryada şarj veya deşarj için 3,2 A anlamına gelmektedir.

Özgül Enerji : Bataryanın birim kütle başına ne kadar enerji depoladığını gösterir. Birimi Wh/kg'dır.

$$\text{Özgül Enerji} = \text{Anma Wh Kapasitesi} / \text{Batarya Kütlesi}$$

Özgül Güç: Birim kütle başına bataryanın gücünü temsil eder. Birimi W/kg .

$$\text{Özgül Güç} = \text{Anma Gücü} / \text{Batarya Kütlesi}$$

Enerji Yoğunluğu: Volumetrik enerji yoğunluğu olarak da ifade edilir ve hacim başına adsal batarya enerjisidir (Wh/l).

Güç Yoğunluğu: Birim batarya hacmi başına bataryanın anma gücüdür (W/l).

İç Direnç : Batarya içerisindeki toplam eşdeğer dirençtir. Bu direncin değeri şarj ve deşarj durumuna göre ve çalışma koşullarına göre değişiklik gösterebilir.

Pik Güç : USABC (U.S. Advanced Battery Consortium)'ye göre pik güç;

$$P = \frac{2 \cdot V_{oc}^2}{9 \cdot R}$$

Burada V_{oc} açık devre voltajı ve R bataryanın iç direncidir.

Cut-off Voltajı: Üretici tarafından minimum izin verilen voltajdır.

State of Charge (SOC) : Şarj durumu olarak da söyleyebileceğimiz SOC bataryadaki mevcut kapasitenin maksimum kapasiteye oranıdır. SOC batarya yönetimi için kritik öneme sahiptir. Doğru ölçülmesi gayet zor olmasına karşın bataryanın sağlıklı ve güvenli çalışması için gereklidir.

Depth of Discharge (DOD) : Boşalma derinliği diye de ifade edilen DOD toplam batarya kapasitesinin deşarj yüzdesidir.

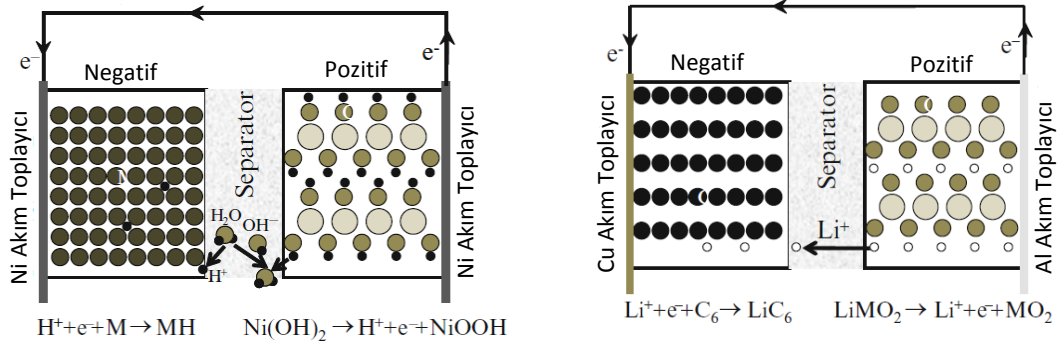
$$DOD = 1 - SOC$$

State of Health (SOH): Eskimiş bataryanın maksimum şarj kapasitesinin yeni bataryanın maksimum şarj kapasitesine oranıdır. SOH, bataryanın performansının bozulma derecesini belirlenmesi ve bataryanın kalan ömrünün tahmin edilmesi için önemli bir parametredir.

Çevrim Ömrü: Bataryanın belirli bir DOD değerinde (genellikle %80) gerçekleştirebileceği şarj deşarj çevrimi sayısıdır (Young, Wang, Wang ve Strunz, 2013). Burada bir şarj ve bunun akabinde yapılacak bir deşarj işlemi bir çevrimi ifade etmektedir.

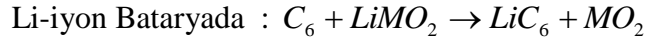
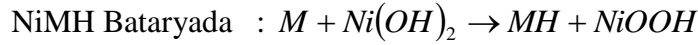
2.3.2 Şarj Edilebilir Bataryaların Temel Çalışma Prensipleri

Bir batarya yüksek potansiyel tutan bir pozitif elektrot, daha düşük bir potansiyel tutan negatif elektrot ve bunların arasında iyon geçişine müsaade eden elektrolitten meydana gelir. Şarj sırasında pozitif elektrot olan anotta indirgenme reaksiyonu meydana gelirken negatif elektrot olan katotta oksidasyon reaksiyonu meydana gelir (şekil 2.8). Deşarj durumunda reaksiyon tersine dönerek pozitif ve negatif elektrotlar, katot ve anot elektrotu haline gelirler (Young ve diğer., 2013). Deşarj sırasında iyonlar anottan, elektrolit ve seperatörden geçerek katota doğru akarlar. Bu esnada anotta oksidasyon reaksiyonu gerçekleşir yani elektron kaybı yaşanır. Katotta ise indirgenme reaksiyonu ile elektron sayısı artar.



Şekil 2.8 Şarj durumunda NiMH ve Li-iyon bataryada meydana gelen reaksiyonlar

Şarj durumunda meydana gelen genel reaksiyon:



Batarya hücresinde bu reaksiyonların sağlanabilmesi için elektrot malzemenin elektrik iletkenliği sağlanmalıdır. Bu amaçla elektrot malzemeleri yüksek iletken metal ile kaplanır. Bu malzemeler NiMH(Nikel Metal Hidrid) bataryalarda Ni olup, Lityum iyon bataryalarda ise CU ve Al Elektrotlar arasında kısa devre gerçekleşmemesi için mikro gözenekli seperatörler kullanılır. Elektrolit olarak ise genellikle KOH (Potasyum hidroksit) kullanılmaktadır (Polat ve Keleş, 2012).

2.3.3 Lityum İyon Batarya

1970 yılında lityum metalinin enerji uygulamalarında kullanımına ait avantajlar fark edildikten sonra 1972’de ilk defa katot olarak TiS_2 ve anot olarak lityum metali kullanılarak lityum pili üretilmiştir. 1980 yılında sülfür içeren katot malzemelerin uzun çevrimler boyunca kararlı kalmadığı keşfedilmiştir. 1991 yılında Sony, LiCoO_2 ’nin katot, karbonun anot olarak kullanıldığı lityum iyon pili üretmiştir. Daha sonra geliştirilen teknolojiler ile lityum iyon pilinin özgül güçleri ve ömürleri yükselmiş, otomotiv sektöründe en önemli batarya tipi konumuna gelmiştir (Polat ve Keleş, 2012).

Otomotiv sektöründe en çok kullanılan bataryalardan biri olan lityum iyon batarya NiMH bataryaya göre daha yüksek özgül enerji ve çıkış gücü değerlerine sahiptir. Bunun yanında uzun ömürlü oluşu, çabuk şarj olabilme kabiliyeti, yüksek enerji verimi, yüksek özgül enerjiye sahip olması gibi avantajları mevcuttur. Buna karşın

yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun olmayışı, güçlü bir sıvı soğutmaya ihtiyaç duyması ve bu nedenle soğutma sistemi parçaları dolayısıyla ek kütle ve maliyet içermesi lityum iyon bataryanın dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır (Young ve diğer., 2013).

Lityum iyon bataryaların katot malzemesine göre birçok çeşidi bulunmaktadır. Lityum kobalt oksit (LiCoO_2) batarya yüksek özgül enerji değerine sahip olmakla birlikte daha çok cep telefonları, laptoplar ve dijital kameralarda kullanılmaktadır. Bu tip bataryalar yüksek kapasiteye sahip olmalarına karşın pahalı ve hızlı şarja karşı güvenli olmamaları gibi dezavantajları mevcuttur. Lityum mangan oksit (LiMn_2O_4) batarya ise düşük maliyetli olmasına rağmen ömür, kapasite ve performans olarak diğer çeşitlere göre avantajlı değildir. LiMn_2O_4 batarya özellikle cep telefonlarında tercih edilmiş olup otomotiv alanında da kullanımı mevcuttur. Otomotiv alanında sıkça kullanılan ve bu tez kapsamında da tasarlanan araç için kullanımı uygun görülen bir diğer batarya tipi ise Lityum demir fosfat (LiFePO_4) bataryadır (Tablo 2.1). Düşük iç dirence sahip bu bataryalar ömür ve güvenlik bakımından diğerlerinden daha iyi olup maliyeti de düşüktür. Lityum nikel mangan kobalt oksit-NMC (LiNiMnCoO_2) ve Lityum Nikel Kobalt Alüminyum oksit-NCA (LiNiCoAlO_2) batarya ise yüksek batarya kapasitesi ve düşük maliyetine karşın ömür bakımından kötüdürler (Young ve diğer., 2013).

Tablo 2.1 Lityum iyon batarya çeşitlerine ait karakteristik özellikler

Özellikler	Lityum Kobalt LiCoO_2 - LCO	Lityum Mangan LiMn_2O_4 - LMO	Lityum Fosfat LiFePO_4 - LFP	LiNiMnCoO_2 - NMC
Voltaj	3,6 V	3,8 V	3,3 V	3,6 V / 3,7 V
Şarj Limit Voltajı	4,2 V	4,2 V	3,6 V	4,2 V
Çevrim Ömrü	500-1000	500-1000	1000-2000	1000-2000
Özgül Enerji	150-190 Wh/kg	100-135 Wh/kg	90-120 Wh/kg	140-180 Wh/kg
Yükleme (C oranı)	1 C	10 C, 40 C anlık	35 C	10 C

Lityum iyon bataryalarda anot malzemesi olarak ise genellikle yüksek özgül enerji ve düşük maliyete sahip grafit kullanılır. Ayrıca ömrü yüksek olan lityum titan-LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) da kullanılmasına karşın bu bataryanın enerji yoğunluğu ve kapasitesi düşüktür (Young ve diğer., 2013).

2.3.4 Elektrikli Araçlarda Bataryanın Şarj Edilme Yöntemleri

Bilindiği üzere elektrikli bir araçta yakıt deposu ve içten yanmalı bir motor bulunmamakta, bunun yerine bir elektrik motoru ve buna enerji sağlayan bir yüksek gerilim bataryası bulunmaktadır. Bunun yanında şebekeden bataryayı şarj etmek üzere şebekedeki alternatif akımı doğru akıma çeviren (AC/DC) bir doğrultucu, daha düzgün bir doğru akım elde etmek için isteğe bağlı olarak kullanılan bir filtre ve bir DC/DC çeviriciden oluşan şarj modülü ve aracın tahrik dışındaki elektriksel yüklerini beslemek üzere bir alçak gerilim bataryası mevcuttur. Öncelikle şarj bağlantısı üzerinden, şebekeden elektrikli araca gelen gerilim araç içindeki AC/DC doğrultucu ile doğru akıma dönüştürülmektedir ve meydana gelen DC gerilim aracın DC barasına verilmektedir. Aracın şarjı sırasında DC baradan sadece batarya grubuna doğru bir enerji akışı söz konusudur (Erhan, Ayaz ve Özdemir, 2013).

Bataryanın dolum işlemini gerçekleştirebilmek için farklı tipte şarj üniteleri mevcuttur. Şarj ünitesi, elektrik enerjisinin elektrikli araca iletilmesini güvenli olarak gerçekleştiren bölümdür. Şarj ünitesi, Avrupa, Amerika ve Japonya gibi bölgelerde farklı standartlara sahiptir. Japonya CHAdeMO (Charge de Move-Charge for Moving) standardında sahip olup araçları doğru akım ile 62,5 kW'a kadar şarj eden üniteler geliştirmiştir. Avrupa'da IEC (International Electrotechnical Commission) 62196 standardı geçerli olup alternatif akım ile 3 faz ve 43,5 kW'a kadar şarj edilebilmektedir. Amerika ise SAE (Society of Automotive Engineers) J1772 standardı ile 19,2 kW'a kadar şarj edebilmektedir (Young ve diğer., 2013).

Şarj istasyonları standartlara göre 3 tip olarak sınıflandırılmaktadır (Tablo 2.2). Burada seviye 1 yavaş şarj, seviye 2 normal (orta hızda) şarj, seviye 3 ise 3 fazlı veya DC olarak hızlı şarj anlamına gelmektedir. 1. seviye şarj üniteleri genellikle konutlarda ve iş yerlerinde, 2. seviye şarj üniteleri alışveriş merkezleri, park, piknik alanları ve istasyonlarda, 3. Seviye şarj istasyonları ise yüksek şarj kapasitesinden dolayı acil enerji ihtiyacı olan ticari dolum istasyonları ve mola yerlerinde kullanılmaktadır (Erhan, Ayaz ve Özdemir, 2013).

Tablo 2.2 Plug-in şarj etme seviyelerinin karakteristik özellikleri

Şarj Tipleri	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3	
	1 Faz AC	1 Faz AC	3 Faz AC	DC
Gerilim (V)	120-240	208-240	240-480	300-600
Güç (kW)	1,2-3,8	3,8-14,4	>14,4	>14,4
Akım (A)	15-20	20-85	>85	>85
Şarj Süresi (saat)	4-12	1-4	<1	<1

Bataryanın şarj edilmesi sırasında amaç, bataryaya zarar vermeden kısa sürede şarj olabilmesi için şarj cihazını ve bataryanın limitleri dahilinde, bataryada maksimum akımı sağlamaktır. Bunun için farklı yöntemler mevcuttur. En çok kullanılan batarya şarj yöntemleri; sabit akımda şarj, sabit gerilimde şarj ve sabit akım-sabit gerilimde şarj yöntemidir (Yıldız ve Topçu, 2012).

Sabit akımda şarj etme yönteminde şarj akımı seri bağlı olan tüm batarya hücrelerinde eşittir. Bataryalarda SOC durumu arttıkça iç direnç de artış göstereceğinden dolayı, sabit akımda şarja devam edebilmek için voltaj sürekli arttırılmalıdır. Bu yöntemde bataryanın şarj akımının çok yüksek seçilmesi halinde batarya kısa sürede dolmasına karşın bataryanın aşırı şarja maruz kalması gibi sakıncası da mevcuttur. Bu durumda aşırı ısınmadan dolayı bataryanın zarar görme riski vardır.

Sabit gerilimde şarj etme yönteminde şarj başlangıcında bataryada düşük iç direnç bulunduğu için enerji kaynağından yüksek akım çekilebilir. SOC artışına bağlı olarak artan batarya iç direnci nedeniyle şarj akımı zamanla azaltılarak sabit gerilimde şarj etme işlemi gerçekleştirilir.

Sabit akım-sabit gerilim ile şarj yönteminde ise şarjın başlangıcında önceden ayarlanmış bir gerilim seviyesine kadar sabit akımla başlar ve o noktadan sonra sabit gerilimle devam ederek şarj işlemi tamamlanır.

2.4 Eşdeğer Batarya Modelleri

Bataryanın üretimi kadar şarj-deşarj seviyesinin izlenmesi ve bataryanın işletimi sırasındaki enerji yönetimi de önemlidir. Batarya yönetim sisteminin en önemli işlevlerinden birisi de şarj vedeşarj durumuna göre bataryanın doluluk durumunun

izlenmesi ve denetimidir. Batarya doluluk durumu (SOC) temelde batarya akım karakteristiğinin bir fonksiyonu olmakla beraber diğer batarya fonksiyonlarıyla da ilişkilidir. Batarya doluluk durumun doğrudan ölçümü bulunmayıp batarya ile ilgili fiziksel, kimyasal ve elektriksel pek çok parametreye bağlı olarak yaklaşık kestirim hesabı mümkündür. Batarya karakteristikleri ve bunlara bağlı olarak batarya doluluk durumunun hesaplanması için birçok batarya modeli geliştirilmiştir (Sayın ve Yüksel, 2011).

En sık kullanılan batarya modelleri, elektrokimyasal model ve eşdeğer devre modeli olarak iki grupta sınıflandırılırlar. Elektrokimyasal modellerin hesaplama doğruluk dereceleri yüksek olmakla beraber doğrusal olmayan denklem takımları içermesi bu sebeple çözüm süresinin uzun ve karmaşık olması ile dinamik simülasyon çalışmalarına uygun olmamasından dolayı dezavantajlı durumdadırlar (Young ve diğer., 2013).

Eşdeğer devre modelleri, bataryayı kondansatörler, dirençler, diotlar ve voltaj kaynağından oluşan elektrik devresi olarak modellemek için kullanılır (Young ve diğer., 2013). Elektrikli araç çalışmalarında kullanımı popüler olan bu yaklaşım modeli basitleştirerek hesaplama güçlüklerini ortadan kaldırmayı amaçlar. Temel olarak 4 tip eşdeğer devre modeli mevcuttur. Bunlar RC (resistive-capacitive) modeli, Rint (internal resistance) modeli, Thevenin modeli ve PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) Modelidir.

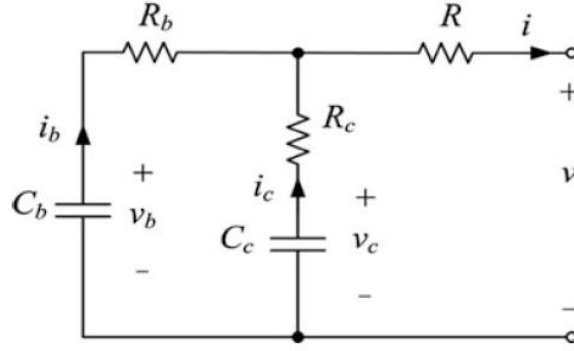
2.4.1 Elektrokimyasal Model

Elektrokimyasal model temelde elektrokimyaya dayanan ve termodinamik etkileri ihmal eden bir yaklaşıma sahiptir. Bu model SOC miktarını tahmin edebilmesine karşın belirli bir yükleme durumunda veya sıcaklık etkisinde voltaj değişimi oranını belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bataryada yüksek deşarj akımı için, Q batarya kapasitesi (Ah), C_p Peukert sabiti, I akım ve n Peukert üstel katsayısı (1,3-1,4) olmak üzere Peukert denklemi (Maddala, 2003):

$$Q = C_p \cdot I^{1-n} \quad (2.4)$$

2.4.2 RC Modeli

RC modeli, aynı zamanda batarya üreticisi olan Saft şirketi tarafından tasarlanmıştır ve Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından Advisor ticari yazılımı için geliştirilmiş ve iyi sonuçlar vermiştir. RC eşdeğer devre modeli 2 adet kapasitör (C_c , C_b) ve 3 adet dirençten (R_b, R_c, R) meydana gelmiştir (Şekil 2.9) (He, Xiong ve Fan, 2011).



Şekil 2.9 RC Eşdeğer devre modeli şeması

C_c kapasitörü düşük kapasiteye sahip olup bataryanın yüzey etkisini temsil etmektedir. C_b kapasitörü ise yüksek kapasiteye sahip olup bataryanın kimyasal olarak şarj depolama yeteneğini temsil etmektedir. Bu modelde SOC, C_b kapasitöründen geçen voltaj ile belirlenebilir. R , R_b ve R_c dirençleri ise sırasıyla terminal direnç, uç direnç ve kondansatör direnci olarak adlandırılır. v_b ve v_c ise C_b ve C_c kapasitörlerinden geçen voltajlardır.

Tablo 2.3 RC Batarya modeli devre elemanları

Sembol	Birim	Tanım
v	V	Terminal Voltaj
i	A	Terminal Akım
v_b	V	C_b Kapasitör Voltajı
i_b	A	C_b Kapasitöründen Geçen Akım
v_c	V	C_c Kapasitör Voltajı
i_c	A	C_c Kapasitöründen Geçen Akım
T_a	$^{\circ}\text{C}$	Hava Sıcaklığı
T	$^{\circ}\text{C}$	Hücre Sıcaklığı
q_c	W	Isı İletim Transfer Oranı
q_b	W	Batarya Hücresinde Meydana Gelen Isı Transfer Oranı
q_{ac}	W	Soğutma Isı Transfer Oranı
R_T	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	Eşdeğer Termal Direnç
S	-	SOC
S_b	-	SOC_{C_b}
S_c	-	SOC_{C_c}
η	-	1, Şarj durumunda 2, Deşarj Durumunda

RC batarya modelinin eşdeğer devre denklemleri:

$$C_b \cdot \dot{v}_b = -i_b \quad (2.5)$$

$$C_c \cdot \dot{v}_c = -i_c \quad (2.6)$$

$$v_b - i_b \cdot R_b = v_c - i_c \cdot R_c \quad (2.7)$$

$$i = i_b + i_c \quad (2.8)$$

$$v = v_c - i_c \cdot R_c - i \cdot R \quad (2.9)$$

Batarya termal modeli için birinci dereceden denklemler:

$$q_c = \frac{T - T_a}{R_T} \quad (2.10)$$

$$C_T \cdot \dot{T} = q_b - q_c - q_{ac} \quad (2.10)$$

Bunlara ek olarak dirençler de sıcaklığa, SOC durumuna ve şarj yada deşarj olma durumuna göre değişiklik göstermektedir. SOC miktarı ise C_b ve C_c değerlerine bağlıdır.

$$S = \alpha_b \cdot S_b + \alpha_c \cdot S_c \quad (2.12)$$

Burada $\alpha_b + \alpha_c = 1$ olmalıdır. NREL tarafından geliştiren ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) programında $\alpha_b = 20/21$ ve $\alpha_c = 1/21$ olarak ifade edilmiştir (Johnson, 2002). Batarya voltaj ve sıcaklık ifadelerini veren denklemler (Young ve diğer., 2013). :

$$\dot{v}_b = \frac{v_b - v_c}{(R_b + R_c) \cdot C_b} + \frac{R_c}{(R_b + R_c) \cdot C_b} \cdot i \quad (2.13)$$

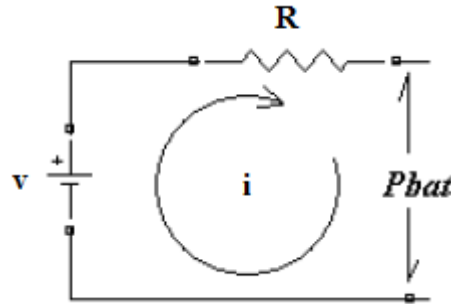
$$\dot{v}_c = \frac{v_c - v_b}{(R_b + R_c) \cdot C_c} + \frac{R_b}{(R_b + R_c) \cdot C_c} \cdot i \quad (2.14)$$

$$\dot{T} = \frac{1}{C_T} \cdot q_b - \frac{1}{C_T \cdot R_T} \cdot T + \frac{1}{C_T \cdot R_T} \cdot T_a - \frac{1}{C_T} \cdot q_{ac} \quad (2.15)$$

$$v = \frac{R_b \cdot v_c + R_c \cdot v_b}{R_b + R_c} - \left(\frac{R_b \cdot R_c}{R_b + R_c} + R \right) \cdot i \quad (2.16)$$

2.4.3 Rint Modeli

Rint Modelinde (Şekil 2.10) v ideal voltaj kaynağı olarak batarya açık devre voltajını ifade eder. İç direnci gösteren R ve açık devre voltajı v aynı zamanda SOC, SOH ve batarya sıcaklığının fonksiyonudur. Örneğin düşük sıcaklıklarda batarya iç direnci daha yüksektir (Boyalı, 2008). Yükleme akımını gösteren i ifadesi ise deşarj durumunda pozitif, şarj durumunda ise negatif değerler almaktadır.



Şekil 2.10 Rint eşdeğer devre modeli şeması

Batarya iç gücü P_s be batarya terminal gücü P_{bat} olmak üzere:

$$P_s = v(SOC(t)) \cdot i(t) \quad (2.17)$$

$$P_{bat} = v(SOC(t)) \cdot i(t) - i(t)^2 \cdot R(SOC(t), sign(P_{bat})) \quad (2.18)$$

Batarya şarj miktarı (SOC), bataryada kalan şarjın $Q(t)$, batarya nominal kapasitesi Q_0 'a oranıdır.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (2.19)$$

$$\dot{Q}(t) = i(t) \quad (2.20)$$

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{i(t)}{Q_0} \quad (2.21)$$

Şarj ve Deşarj durumlarında, batarya gücü ve akımı işaret değiştireceği için ve batarya iç dirençleri de şarj ve deşarj durumlarında farklılık göstereceğinden dolayı denklemler:

$$R \cdot i(t)_{şarj}^2 + v \cdot i(t)_{şarj} - P_{şarj} = 0 \quad (2.22)$$

$$R \cdot i(t)_{deşarj}^2 - v \cdot i(t)_{deşarj} + P_{deşarj} = 0 \quad (2.23)$$

Bu eşitliklerden şarj ve deşarj için akım değerleri çekilecek olursa:

$$i_{şarj} = \frac{-v + \sqrt{v^2 + 4 \cdot R \cdot P(t)_{şarj}}}{2 \cdot R} \quad (2.24)$$

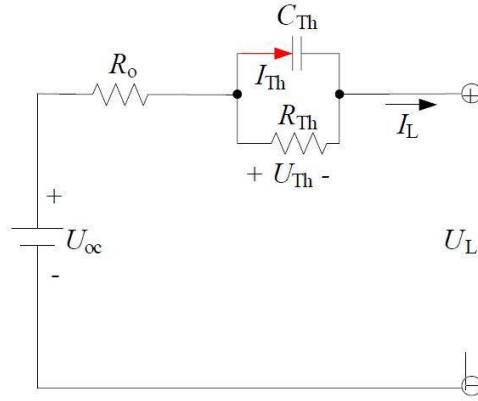
$$i_{deşarj} = \frac{v - \sqrt{v^2 - 4 \cdot R \cdot P(t)_{deşarj}}}{2 \cdot R} \quad (2.25)$$

Batarya iç dirençleri nedeniyle, batarya terminalindeki güç ile batarya iç gücü farklı olduğundan batarya verimi aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir. Verim, batarya şarj seviyesi ve iç dirençlerin bir fonksiyonudur (Boyalı, 2008).

$$\eta(t)_{bat} = \frac{P(t)_s}{P(t)_{bat}} = \frac{v \cdot i(t)}{v \cdot i(t) + i(t)^2 \cdot R} \quad (2.26)$$

2.4.4 Thevenin Batarya Modeli

Thevenin batarya modeli (Şekil 2.11), Rint modeline seri olarak, paralel bir RC devresinin eklenerek bataryanın dinamik karakteristiklerini tarif eden bir modeldir (Jiang, 2013).



Şekil 2.11 Thevenin eşdeğer devre şeması

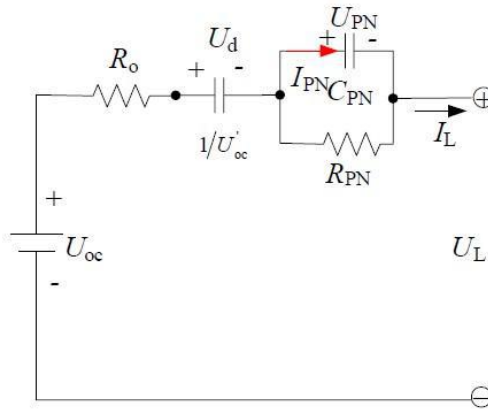
Bu modelde U_{OC} açık devre voltajı, R_0 iç direnç, R_{TH} kutuplanma direnci, C_{TH} eşdeğer kapasitans ve I_{TH} de C_{TH} 'den geçen akımı ifade etmektedir. U_L batarya terminal voltajı olmak üzere:

$$\dot{U}_{TH} = -\frac{U_{TH}}{R_{TH} \cdot C_{TH}} + \frac{I_L}{C_{TH}} \quad (2.27)$$

$$U_L = U_{OC} - U_{TH} - I_L \cdot R_0 \quad (2.28)$$

2.4.5 PNGV Modeli

PNGV batarya modeli (Şekil 2.12), yüklenme akımından dolayı meydana gelen açık devre voltajındaki değişimleri tarif edebilmek için Thevenin modeline bir adet kapasitör eklenerek oluşturulmuştur (Jiang, 2013).



Şekil 2.12 PNGV Eşdeğer devre şeması

Bu devre şemasında gösterilen U_d ve U_{PN} , sırasıyla $1/U'_{OC}$ ve C_{PN} kapasitörlerinden geçen voltajlar olup I_{PN} ise C_{PN} 'den geçen akımdır. Sistem aşağıdaki denklemlerde ifade edildiği şekilde davranmaktadır.

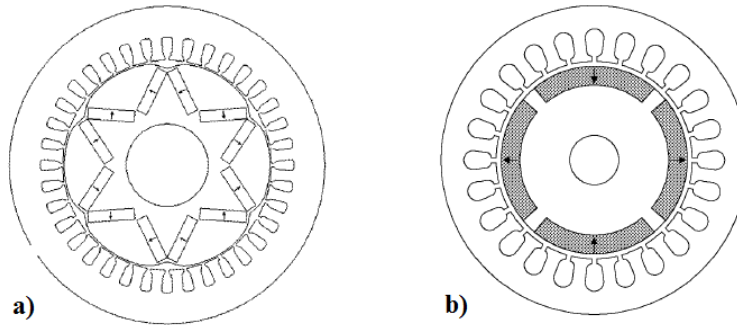
$$\dot{U}_d = U'_{OC} \cdot I_L \quad (2.29)$$

$$\dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} \cdot C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \quad (2.30)$$

$$U_L = U_{OC} - U_d - U_{PN} - I_L \cdot R_0 \quad (2.31)$$

2.5 Elektrik Motoru Modeli

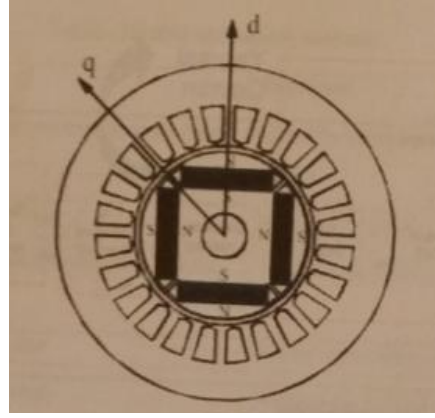
Elektrikli araçlarda yaygın olarak günümüzde asenkron motorlar kullanılsa da Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) avantajlı ve gelecek vadeden motorlar olarak gözükmemektedir. Temel avantajları; yüksek güç/ağırlık oranına sahip olması, yüksek ivmelenme kabiliyeti, moment geçişlerinin düzgün olması, yüksek hız ve moment üretebilme kapasitesi, yüksek verim olarak sürekli mıknatıslı senkron motorlar öne çıkmaktadır. Ayrıca bu motorlarda rotor kütlelerinin düşük olması nedeniyle uygulana gerileme karşı tepki süreleri küçüktür. Sürekli mıknatıslı senkron motorların manyetik karakteristiklerinin zamanla değişmesi ve fiyatının yüksek olması ise dezavantajları olarak gösterilebilir (Akyazı, Küçükali ve Akpınar, 2011). Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilen ve mıknatısları rotor ekseninin içine doğru yerleştirilen tip olmak üzere başlıca iki çeşittir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Mıknatısları rotor ekseninin içine (a) yerleştirilmiş ve mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş (b) sürekli mıknatıslı senkron motor (Odvarka, Mebarki, Gerada, Brown ve Ondrusek, 2009).

Sürekli mıknatıslı senkron motorda üretilen motor akısı ile birlikte, mıknatıslar tarafından üretilen rotor akısı motorun momentini ve hızını belirler. Maksimum moment üretebilmek için stator akısı ile rotor akısı arasındaki faz farkı 90^0 ve sinüs dalgalı gerilim çıkışı 3 fazlı stator sargılarına uygulanmalıdır. Bunun için motorun sürücü devrelerle kontrol edilmesi gerekir (Akyazı, Küçükali ve Akpınar, 2011).

Sürekli mıknatıslı senkron motorunda, maksimum relüktans hattı d eksenini ve mıknatısların olmadığı minimum relüktans hattı q eksenini ile tarif edilmektedir (Şekil 2.14). Şekilde de görüldüğü gibi dönen d-q koordinat sisteminin d eksenini mıknatıs eksenini ile çakışmaktadır. Bu da d eksen akı yolunun, q eksen akı yoluna göre daha fazla relüktans oluşturması anlamına gelmektedir.



Şekil 2.14 d ve q Eksenlerinin belirlenmesi

suretiyle d-q eksen takımındaki bağıntıları:

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \quad (2.32)$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_d \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_e \cdot L_q \cdot i_d + \omega_e \cdot \lambda_{pm} \quad (2.33)$$

$$P_{EM} = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (2.34)$$

Burada v_d ve v_q sırasıyla d ve q eksen voltajı (V), i_d ve i_q sırasıyla d ve q eksen akımı (A), R_s stator faz direnci (Ω), L_d ve L_q sırasıyla d ve q endüktansları (Henry), λ_{pm} sürekli mıknatıs akısı (Wb), ω_e stator açısal frekansı (rad/s) ve P_{EM} elektrik giriş gücünü (W) ifade etmektedir. Burada en önemli parametrelerden birisi λ_{pm} parametresidir. Bu parametre mıknatıs toplam akısının doğru olarak belirlenmesi ile

ortaya çıkar ve yapılacak hata motor performansının doğru olarak tahmin edilememesi anlamına gelir.

P kutup sayısı olmak üzere oluşan elektromanyetik tork T_e (Nm):

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{pm} \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (2.35)$$

Motor çıkış gücü T_s (Nm):

$$T_s = T_e - J_s \cdot \frac{dw_s}{dt} + B_v + T_c \quad (2.36)$$

Burada J_s rotor atalet momenti (kgm^2), T_c coulomb momenti (Nm) ve B_v viskoz sürtünme katsayısını (Nms/rad) ifade etmektedir.

2.6 İnvörtör (Evirici) Modeli

İnvörtörler DC giriş gerilimini AC çıkış gerilimine çeviren devre elemanlarıdır. Elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde, 3 fazlı gerilim beslemeli PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) invörtörler, sürekli mıknatıslı motor kontrollerinde kullanılmaktadır. Ayarlanacak motor akımının olması gereken değerleri mikro kontrolör yoluyla araç kumandasının moment öngörülerine uygun şekilde ayarlanır (Ünlü ve diğer., 2003).

Genel olarak tüm güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarların nominal gerilimi, anahtarlama sırasında oluşan gerilim yükselmeleri nedeniyle, bara geriliminin iki katı seçilir (Ünlü ve diğer., 2003).

Anahtarlama elemanları (switch) ve diyotlardan oluşan invörtörde verim değeri dikkate alınması gereken bir husustur. Burada V_{bat} batarya voltajı [V], anahtar iç direnci $R_{Q,Inv}$ [Ω], diyot iç direnci $R_{D,Inv}$ [Ω], I_p pik faz akımı [A] ve V_p pik faz voltajı [V], m_i modülasyon indeksi, ϕ_{EM} güç faktör açısı [rad], $V_{Q,th,Inv}$ ve $V_{D,th,Inv}$ da anahtar ve diyot eşik voltajları [V] olmak üzere tek bir anahtar ortalama güç kaybı $P_{Q,Inv}$ [W] ve tek bir diyot ortalama güç kaybı $P_{D,Inv}$ [W]:

$$P_{Q,Inv} = \left(\frac{1}{8} + \frac{m_i}{3\pi} \right) \cdot R_{Q,Inv} \cdot I_p^2 + \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_i}{8} \cdot \cos(\phi_{EM}) \right) \cdot V_{Q,th,Inv} \cdot I_p \quad (2.37)$$

$$P_{D,Inv} = \left(\frac{1}{8} - \frac{m_i}{3\pi} \right) \cdot R_{D,Inv} \cdot I_p^2 + \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m_i}{8} \cdot \cos(\phi_{EM}) \right) \cdot V_{D,th,Inv} \cdot I_p \quad (2.38)$$

$$m_i = \frac{2 \cdot V_p}{V_{bat}} \quad (2.39)$$

İşlemi basitleştirmek için anahtar ve diyot eşik voltajları ile ($V_{th,Inv} = V_{Q,th,Inv} = V_{D,th,Inv}$) dirençleri ($R_{Inv} = R_{D,Inv} = R_{Q,Inv}$) olmak üzere invertördeki toplam güç kaybı $P_{Inv,kayıp}$:

$$P_{Inv,kayma} = 6 \cdot (P_{Q,Inv} + P_{D,Inv}) = \frac{3}{2} \cdot R_{Inv} \cdot I_p^2 + \frac{6}{\pi} \cdot V_{th,Inv} \cdot I_p \quad (2.40)$$

Elektrik motoru giriş gücü P_{EM} olmak üzere invertör giriş gücü P_{Inv} ve verimi η_{Inv} :

$$P_{Inv} = V_{bat} \cdot i_{inv} = P_{EM} + P_{Inv,kayma} \quad (2.41)$$

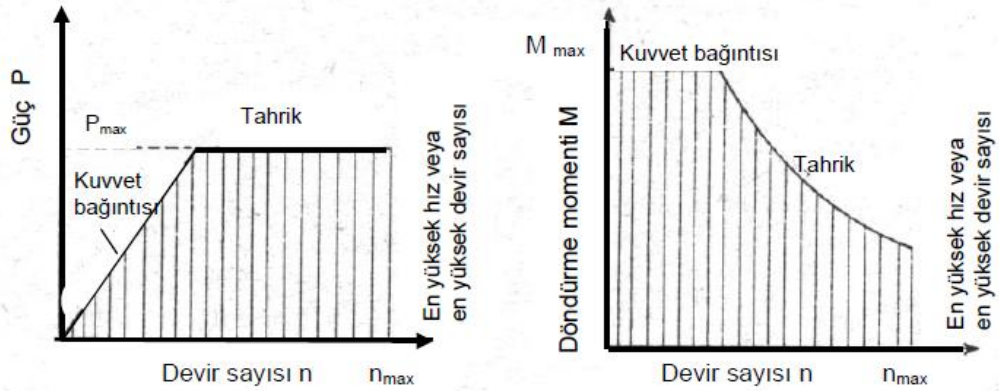
$$\eta_{Inv} = \begin{cases} \frac{P_{EM}}{P_{Inv}}, P_{EM} \geq 0 \\ \frac{P_{Inv}}{P_{EM}}, P_{EM} < 0 \end{cases} \quad (2.42)$$

BÖLÜM ÜÇ

TASARIM KRİTERLERİ VE TAŞIT PERFORMANS DEĞERLERİ

3.1 Temel Tasarım Kriterleri ve Motor Özellikleri

Belirli bir moment ve güç değerine sahip bir taşıtta ideal olan ve arzu edilen taşıttın sürekli sabit güç bölgesinde çalışması ve bunun doğal sonucu olarak momentin devir sayısına göre hiperbolik olarak maksimum güce uygun olarak değişmesidir. Bu ideal eğrilere, (Şekil 3.1) içten yanmalı motorlarda çeşitli vites basamakları kullanarak eğrinin altında kalan alanı olabildiğince doldurmak suretiyle ulaşılmak istenir.



Şekil 3.1 Yol tekerlek kuvvet bağıntısı, maksimum güç ve maksimum hız ile sınırlandırılmış ideal hareket gücü ve tahrik momenti karakteristik eğrileri

Elektrik motorlarının güç ve moment karakteristiği, ideal hareket gücü ve tahrik momenti eğrileri gibi olduğu için içten yanmalı motorlarda olduğu gibi taralı alanın içini kullanabilmek adına farklı vites kademelendirilmesine gerek yoktur. Yalnız tekerlek momentini arttırmak suretiyle aracın çıkabileceği maksimum yokuş eğiminin büyütülmesi için sabit bir çevrim oranı kullanılabilir.

Tasarlanacak bir taşıtta kullanılacak motorun seçimi, taşıttan istenen maksimum hız değeri ve çıkabileceği maksimum yokuş eğimine göre belirlenir. Bu nedenle ivmesiz bir hareket için aracın tahrik tekerlerine etki eden direnç kuvvetleri (F_T) hesaplanmalıdır. Bu kuvvetleri daha önce de belirtildiği üzere yuvarlanma direnci (F_R), hava direnci (F_L), ve yokuş direnci (F_{S1}) oluşturmaktadır.

Hareket dirençlerinin ve gerekli güç ile moment değerlerinin hesaplanmasında kullanılan katsayılar aşağıdaki tabloda gösterildiği şekilde alınmıştır.

Tablo 3.1 Taşıt tasarımında esas alınan parametreler

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>	<i>Birim</i>
Yuvarlanma Direnç Katsayısı (f_R)	0,009	-
Taşıt Projeksiyon Alanı (A)	2	m ²
Yerçekimi İvmesi (g)	9,81	m/s ²
Taşıt Kütlesi (m)	1000	kg
Aerodinamik Direnç Katsayısı (C_W)	0,33	-
Tekerlek Dinamik Yarıçapı (r_{dyn})	0,282	m
Hava Yoğunluğu (ρ_L)	1,2	kg/m ³
Dönen Kütle Faktörü (λ)	1,05	-
Mekanik Verim (η_M)	0,85	-
Elektrik Motoru Verimi (η_{EM})	0,9	-

Aracın karakteristik özelliği olarak %25 yokuş çıkabilme kabiliyeti ile 160 km/h maksimum hıza ulaşabilmesi istenmiştir. Ulaşılmak istenen maksimum hız değerinden yola çıkarak sabit mekanik verim ve sabit elektrik motoru verimi kabulüyle gerekli güç (P):

$$P = \frac{(m \cdot g \cdot f_R + \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot C_W \cdot V^2) \cdot V}{1000 \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}} \quad (3.1)$$

$$P = \frac{\left(1000 \cdot 9,81 \cdot 0,009 + \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 2 \cdot 0,33 \cdot 44,44^2\right) \cdot 44,44}{1000 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = 50,56 \text{ kW} \quad (3.2)$$

Bu sonuçtan yola çıkılarak elektrik motorun gücünün 55 kW olarak alınması uygun görülmüş ve 55 kW (P_M) güç 160 (M_M) Nm moment değeri sağlayan elektrik motorunun seçimi yapılmıştır. Motorun çıkabileceği yokuş eğimini doğrudan etkileyen faktörlerden olan motorun sabit moment bölgesindeki moment değeri ve elektrik motorundan tekerleğe kadar olan toplam çevrim oranı (i) göz önüne alınarak maksimum %25 yokuş eğimini çıkabilecek taşıtın motorunun moment karakteristiğinin belirlenmesi gerekecektir. Bunun için öncelikle dişli kutusu diferansiyel çiftinin çevrim oranının belirlenmesi gerekecektir. Yokuş eğimi α , elektrik motoru maksimum moment M_M olmak üzere çevrim oranı i:

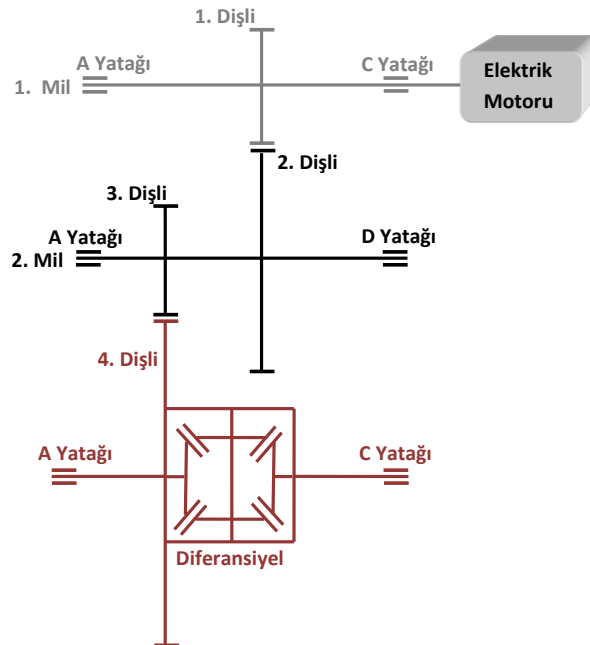
$$i = (f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{r_{dyn}}{M_M \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}} \quad (3.3)$$

$$i = (0,009 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot \cos 14,03 + 1000 \cdot 9,81 \cdot \sin 14,03) \cdot \frac{0,282}{160 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = 5,67 \quad (3.4)$$

Toplam çevrim oranı yukarı değere yuvarlanarak 6 olarak seçilmiştir.

3.2 Sabit Çevrim Oranlı Dişli Diferansiyel Sisteminin Tasarımı

Elektrikli araçların moment-devir sayısı karakteristiğine göre farklı çevrim oranları içeren vites kutusuna gerek yoktur. Elektrik motoru çıkışında motor momentini yükselten ve devir sayısını düşüren sabit çevrim oranlı redüktör tasarlanmıştır. Redüktörde kullanılacak dişli için düz dişliden daha sessiz çalışan ve verimi yüksek helis dişliler kullanılmıştır. Kullanılan diş sayıları birinci dişlide (z_1) 20, ikinci dişlide (z_2) 41, üçüncü dişlide (z_3) 20 ve dördüncü dişlide (z_4) 59 olup bu dişlilerin helis açısı (β_0) ve kavrama açısı (α_0) 20^0 'dir. Eksenleri arasında 90^0 bulunan diferansiyel dengeleme ve aks konik dişlilerin diş sayıları ise 18'dir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Dişli diferansiyel grubu tasarım şeması

Elektrik motorunun maksimum momenti 160 Nm ve maksimum gücü 55 kW olmasına rağmen elektrik motorları anlık olarak nominal momentten daha fazla moment verebilmektedirler. Amerikan standardına göre nominal momentin 1,5 katı kadar momenti 18 saniye boyunca elektrik motorunun sağlaması gerekmektedir. Bu çalışmada elektrik motoru için ilave yükleme faktörü 2 alınmış olup motorun anlık 320 Nm moment (M_1) değerine ulaşacağı kabul edilip hesaplamalar yapılmıştır.

Dişli malzemesi olarak sertleştirilmiş 20MnCr5 sementasyon çeliği kullanılmıştır. Ötelemenin olmadığı durum için form faktörü (q_k) 2,85 alınmış, gövdeye iyi yataklanmış dişli kutusu için diş genişliği faktörü (λ) 25, darbeli elektrik motoru kullanıldığından dolayı işletme faktörü (c_B) 1,5 ve malzemenin diş dibi sürekli mukavemet değeri (σ_{DSG}) 330 MPa alınarak eğilmeye göre 1. ve 2. dişliler için modül ($m_{n1,2}$):

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_{DSG}}{1,5} \text{ olmak üzere,}$$

$$m_{n1,2} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot q_k \cdot M_1 \cdot c_B \cdot \cos(\beta_0)^2}{\lambda \cdot z_1 \cdot \sigma_{em}}} = 2,81 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Birinci ve ikinci dişliler için sistemin güvenliğini arttırmak adına modül 4 mm olarak alınmıştır. Boyutlandırma için diş başı yüksekliği (h_{kw}) ve alın modülü (m_s) olmak üzere dişli boyutları:

$$m_n = m_s \cdot \cos(\beta_0); m_s = 4,26$$

$$h_{kw} = 1,25 \cdot m_n = 5$$

2. milde elektrik motoru çıkış momentinin 2,05 kat kadar (z_2/z_1) arttığı düşünülürse 2. milde meydana gelebilecek maksimum moment (M_2) 656 Nm için aynı işlem katsayıları aynı kalmak koşuluyla 3. ve 4. dişliler için de tekrarlanırsa bu dişlilerdeki modül ($m_{n3,4}$):

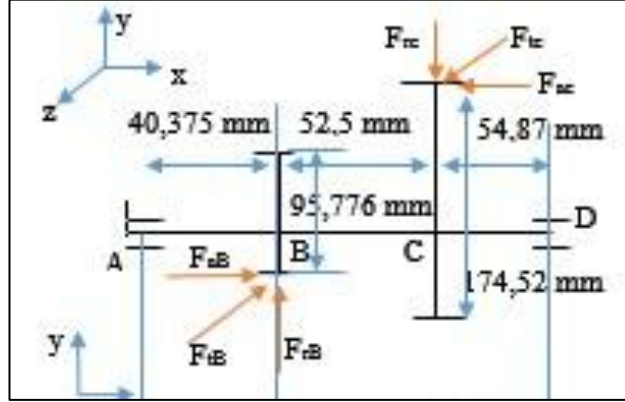
$$m_{n3,4} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot q_k \cdot M_2 \cdot c_B \cdot \cos(\beta_0)^2}{\lambda \cdot z_1 \cdot \sigma_{em}}} = 3,58 \text{ mm} \quad (3.6)$$

$$\Sigma F_z = 0; A_z + C_z - F_{tB} = 0; \quad (3.15)$$

$$A_z = 4987,8N \quad (3.16)$$

$$\Sigma F_x = 0; C_x = 2803,5 N \quad (3.17)$$

Aynı yatak kuvvetleri (Şekil 3.4) 2. mil için de hesaplanırsa:



Şekil 3.4 İkinci mile etkiyen kuvvetler

$$F_{tB} = \frac{2 \cdot M_{t3}}{d_{03}} = 13614 N \text{ (Teğetsel)} \quad (3.18)$$

$$F_{rB} = F_{tB} \cdot \frac{\tan(\alpha_{n0})}{\cos(\beta_0)} = 5273,1 N \text{ (Radyal)} \quad (3.19)$$

$$F_{aB} = F_{tB} \cdot \tan(\beta_0) = 4955,1 N \text{ (Eksenel)} \quad (3.20)$$

$$F_{tc} = \frac{2 \cdot M_{t2}}{d_{02}} = 7702,6 N \text{ (Teğetsel)} \quad (3.21)$$

$$F_{rc} = F_{tc} \cdot \frac{\tan(\alpha_{n0})}{\cos(\beta_0)} = 2983,4 N \text{ (Radyal)} \quad (3.22)$$

$$F_{ac} = F_{tc} \cdot \tan(\beta_0) = 2803,5 N \text{ (Eksenel)} \quad (3.23)$$

$$\Sigma M_A = 0; \quad (3.24)$$

$$F_{rB} \cdot 40,375 - F_{rc} \cdot 92,875 + D_y \cdot 147,75 = 0; \quad (3.25)$$

$$D_y = 434,4 N \quad (3.26)$$

$$\Sigma F_y = 0; A_y = 2724,1 N \quad (3.27)$$

$$\Sigma M_A = 0; \quad (3.28)$$

$$F_{aB} \cdot \frac{95,77}{2} - F_{tB} \cdot 40,375 + F_{tc} \cdot 92,875 - F_{ac} \cdot 90,477 - D_z \cdot 147,75 = 0; \quad (3.29)$$

$$D_z = 4383,5 N \quad (3.30)$$

$$\Sigma F_z = 0; A_z = 10295 N \quad (3.31)$$

$$\Sigma F_x = 0; D_x = 2151,6 N \quad (3.32)$$

1. ve 2. milde rulman seçimi yapılabilmesi için A ve C yataklarına gelen bileşke kuvvetin hesaplanması gerekmektedir.

- 1. mil rulmanı için:

$$F_{rA} = \sqrt{A_y^2 + A_z^2} = 5206,1 N \quad (3.33)$$

$$F_{aA} = 0 \quad (3.34)$$

$$F_{rC} = \sqrt{C_y^2 + C_z^2} = 3097,6 N \quad (3.35)$$

$$F_{aC} = 2803,5 N \quad (3.36)$$

- 2. mil rulmanı için:

$$F_{rA} = \sqrt{A_y^2 + A_z^2} = 10649 N \quad (3.37)$$

$$F_{aA} = 0 \quad (3.38)$$

$$F_{rD} = \sqrt{D_y^2 + D_z^2} = 4405 N \quad (3.39)$$

$$F_{aD} = 2151,6 N \quad (3.40)$$

1. mil yatakları için L_h 15000 saat (günlük 3 saatlik kullanım ve 12 sene çalışma için), 1. mil için maksimum devir sayısı 10000 d/d olarak kabul edilirse makaralı yatak için:

$$f_L = \sqrt[10]{\frac{L_h}{500}} = 2,774 \quad (3.41)$$

$$f_n = \sqrt[10]{\frac{100}{3 \times n}} = 0,181 \quad (3.42)$$

- 1. Mil A yatağı için:

$$F = F_r = 5206,1 N \Rightarrow C_{hesap} = 5206,1 \cdot \frac{2,774}{0,149} = 96924,3 N \quad (3.43)$$

$$C_{tablo} = 100000 N \Rightarrow \text{"32308" Numaralı Rulman Seçilir.}$$

- 1. Mil C yatağı için:

$$F = X.F_r + Y.F_a \quad (3.44)$$

"31308" Rulmanını Kabul Edersek ; $X = 0,4$, $Y = 0,72$

$$F = 3257,56 \text{ N}$$

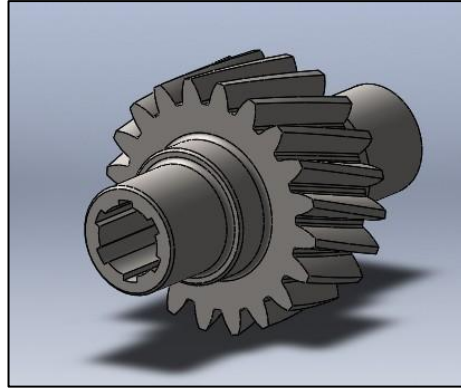
$$F = 3257,56 \text{ N} \Rightarrow C_{hesap} = 3257,56 \cdot \frac{2,774}{0,149} = 60647,45 \text{ N} \quad (3.45)$$

$C_{tablo} = 63000 \text{ N} \Rightarrow$ "31308" Numaralı Rulman Seçilir.

Seçilen 40 mm çaplı rulmanlar için çap kontrolü yapılırsa aşağıdaki sonuçlara göre uygun olduğu görülecektir:

$$d_{statik} = \sqrt[3]{\left[\frac{32.S}{\pi \cdot \sigma_{Ak}} \cdot \sqrt{(M_e^2 + 0,75(M_b^2))} \right]} = 20,5 \text{ mm} \quad (3.46)$$

$$d_{dinamik,kabul} = d_{statik} \cdot 1,5 = 30,7 \text{ mm} \quad (3.47)$$



Şekil 3.5 Birinci mil

2. mil yatakları için L_h 15000 saat (günlük 3 saatlik kullanım ve 12 sene çalışma için), 2. mil için maksimum devir sayısı 4878 d/d olarak kabul edilirse makaralı yatak için:

$$f_L = \sqrt[10]{\frac{L_h}{500}} = 2,774 \quad (3.48)$$

$$f_n = \sqrt[10]{\frac{100}{3 \times n}} = 0,224 \quad (3.49)$$

• 2. Mil A yatağı için:

$$F = F_r = 10649 \text{ N} \Rightarrow C_{hesap} = 10649 \cdot \frac{2,774}{0,224} = 131876 \text{ N} \quad (3.50)$$

$C_{tablo} = 146000 \text{ N} \Rightarrow$ "32310" Numaralı Rulman Seçilir.

- 2. Mil D yatağı için:

$$F = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3.51)$$

"31310" Rulmanını Kabul Edersek ; $X = 0,4$, $Y = 0,72$

$$F = 3311,15 \text{ N} \quad (3.52)$$

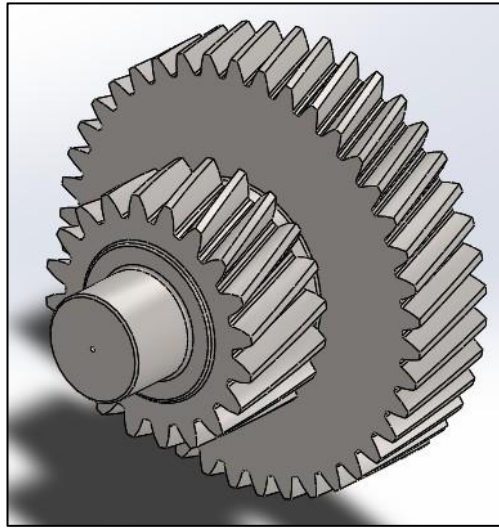
$$F = 3311,15 \text{ N} \Rightarrow C_{hesap} = 3311,15 \cdot \frac{2,774}{0,224} = 41005 \text{ N} \quad (3.53)$$

$C_{tablo} = 91500 \text{ N} \Rightarrow$ " **31310** " Numaralı Rulman Seçilir.

Seçilen 50 mm çaplı rulmanlar için çap kontrolü yapılırsa aşağıdaki sonuçlara göre uygun olduğu görülecektir:

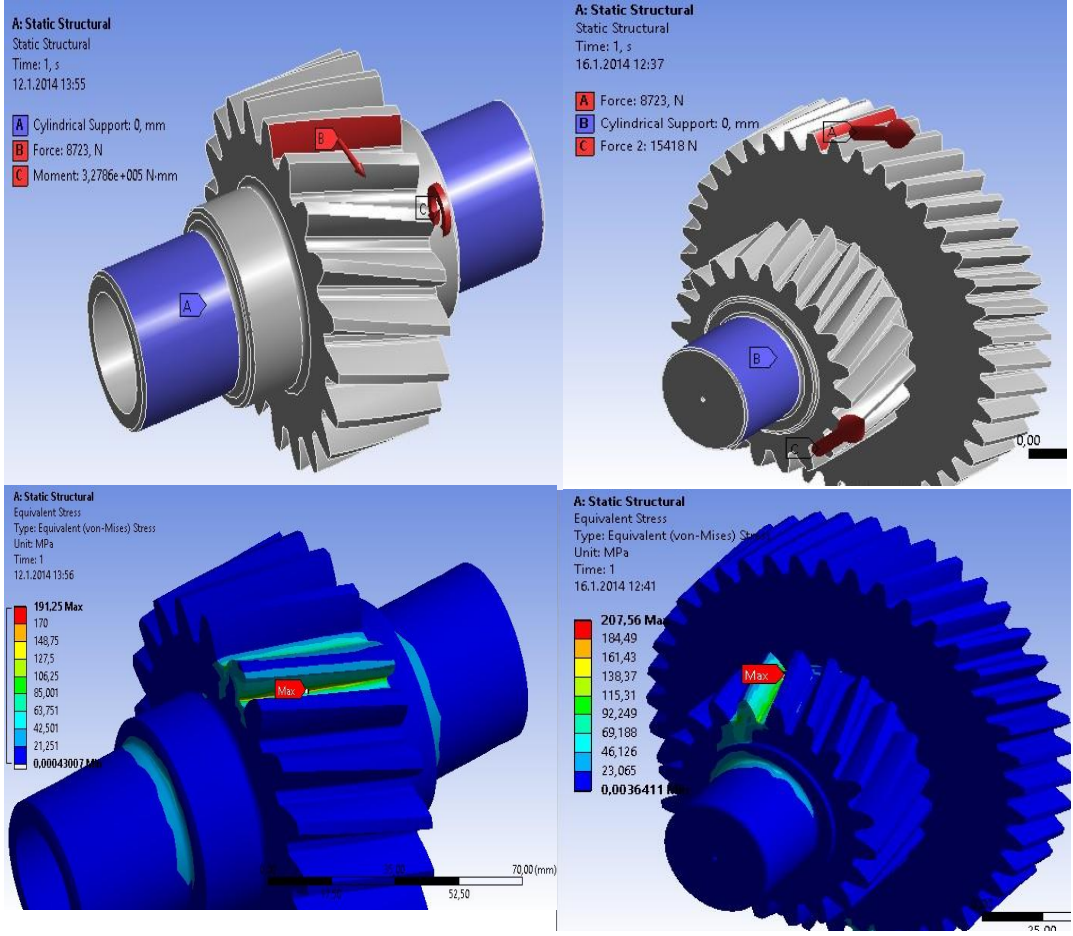
$$d_{statik} = \sqrt[3]{\left[\frac{32 \cdot S}{\pi \cdot \sigma_{Ak}} \cdot \sqrt{(M_e^2 + 0,75 \cdot (M_b^2))} \right]} = 24,93 \text{ mm} \quad (3.54)$$

$$d_{dinamik,kabul} = d_{statik} \cdot 1,5 = 37,4 \text{ mm} \quad (3.55)$$



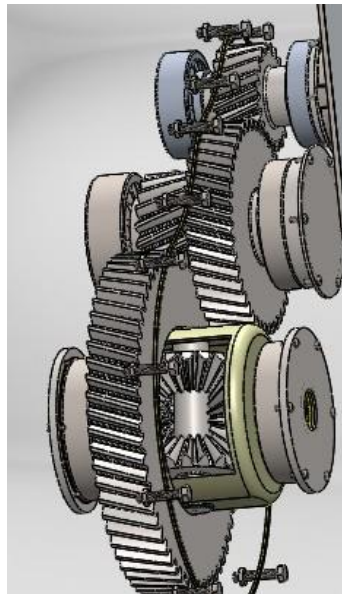
Şekil 3.6 İkinci mil

Dişli boyutları ve mil çapları belirlendikten sonra dişlilere etkiyen kuvvetlere göre gerilme analizi yapılmış ve çıkan gerilme değerlerinin 20CrMn5 dişli malzemesinin akma değeri olan 700 MPa değerinden düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 3.7 1. ve 2. Dişliler için gerilme analizi

Elektrik motoru çıkışına takılacak tek kademeli dişli kutusunun son hali aşağıdaki şekilde gibidir (Şekil 3.8).



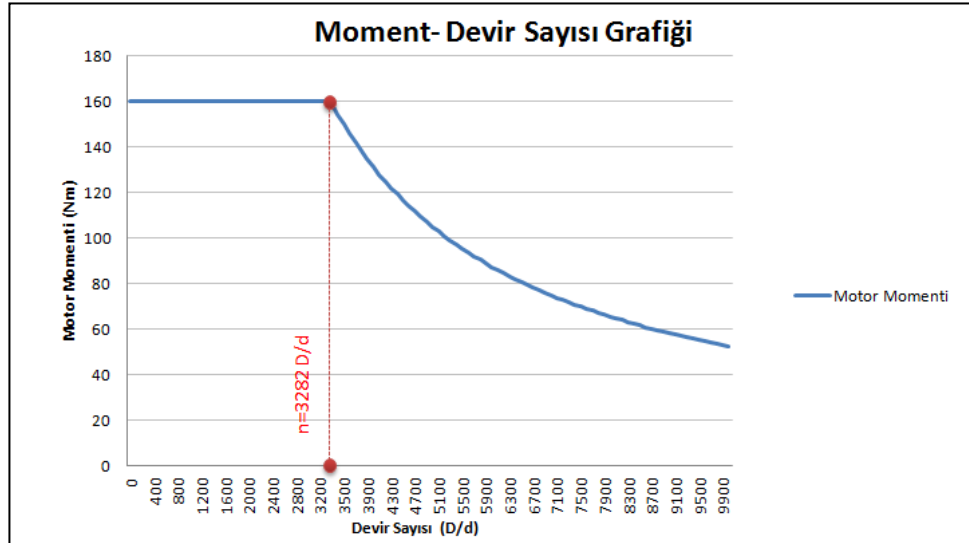
Şekil 3.8 Sabit çevrim oranlı dişli kutusunun montaj görüntüsü

Dış koruyucu kapak kısmı iki parçalı olarak tasarlanmış ve arasına conta konmak suretiyle cıvatalarla birleştirilmiştir. Tasarımda mil yatakları ile koruyucu parça arasında o-ring'ler, elektrik motoru girişinin bulunduğu ve diferansiyel çıkış millerinin bulunduğu yataklarda 2 adet 50x35x8 ve 1 adet 50x40x8 radyal sızdırmazlık elemanı kullanılmıştır.

3.3 Taşıt Performans Özellikleri

Elektrik motorlarının moment karakteristikleri, belirli bir kritik devir sayısına kadar maksimum momenti sabit olarak verip, kritik devir sayısından sonra ise güç hiperbolünü takip eden ve devir sayısına göre azalan eğri şeklindedir (Şekil 3.9). Bahsedilen kritik devir sayısı n_{kr} aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$n_{kr} = \frac{P_M \cdot 9549}{M_M} = \frac{55 \cdot 9549}{160} = 3282 \text{ d/d} \quad (3.56)$$

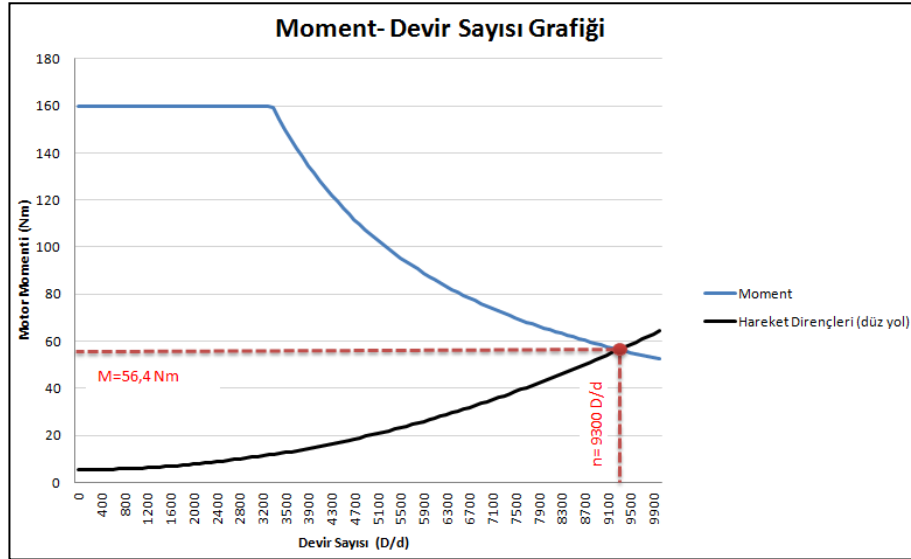


Şekil 3.9 Motor moment eğrisi ve kritik devir sayısı

Düz yol için yuvarlanma ve hava direncinin hesaplanarak direnç momentine çevrilerek motor moment eğrisi içine taşınmasıyla birlikte aracın ulaşacağı maksimum hız, bu hızdaki motor devir sayısı ve momenti görülebilir. Buna göre motor miline indirgenmiş direnç momentleri (M_R):

$$M_R = \frac{\left(m \cdot g \cdot f_R + \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot C_W \cdot V^2 \right) \cdot r_{dyn}}{\eta_M \cdot \eta_{EM} \cdot i} \quad (3.57)$$

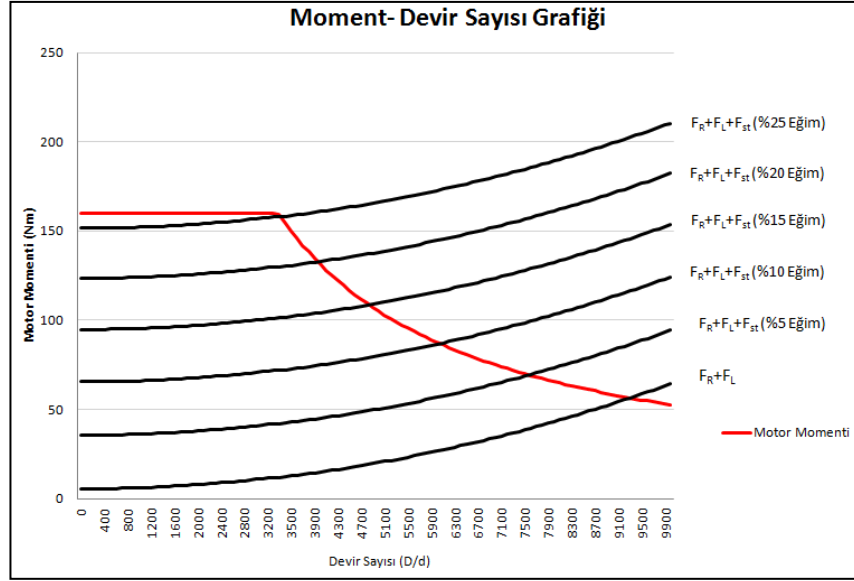
Taşıt hızının motor devir sayısına çevrilmesiyle yukarıdaki eşitliğin grafiği alt eksen motor devir sayısı olacak şekilde çizdirilebilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Motor eksenine indirgenmiş düz yol hareket direnci

Yokuş eğimleri için de hareket direncinin tekerlekte oluşturduğu momentler aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenerek, aradaki sabit çevrim oranının da etkisiyle motora indirgenip, motor momentleriyle üst üste çizdirildiğinde taşıtın çıkabileceği maksimum yokuş eğimi ve farklı yokuş eğimleri için araçtaki rezerv momentler görülebilmektedir.

$$M_R = \frac{\left(m \cdot g \cdot f_R \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot C_W \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha \right) \cdot r_{dyn}}{\eta_M \cdot \eta_{EM} \cdot i} \quad (3.58)$$



Şekil 3.11 Farklı yokuş eğimleri için motor eksenine indirgenmiş hareket dirençleri

Taşıtın sağlaması gereken kriterlerden birisi de 80 km/h hızda %10'luk bir yokuşu çıkabilmesidir. Yukarıdaki grafikten de görüldüğü gibi taşıt 80 km/h hızda (4515 d/d) %10 yokuşu çıkabilmektedir.

3.3.1 Taşıt Performans Değerleri

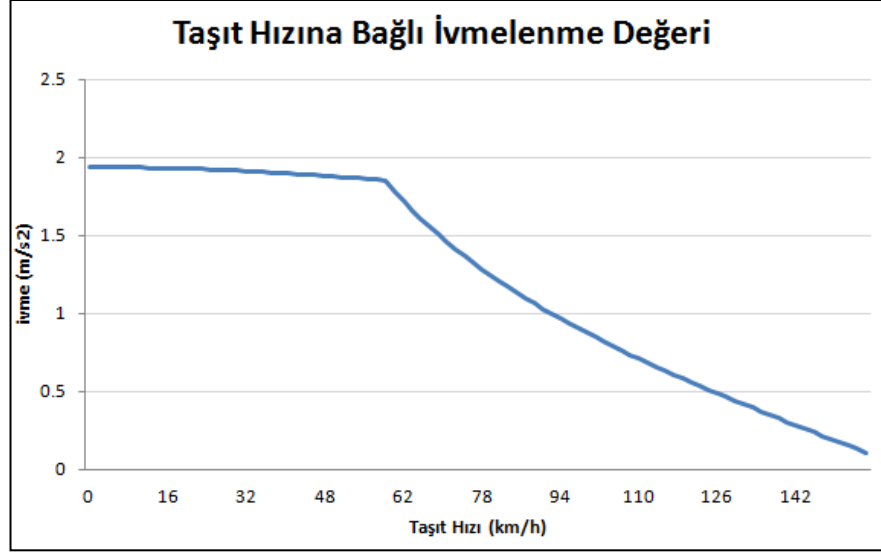
Taşıt tasarımında en önemli performans kriteri ivmelenme kabiliyeti ve 0'dan 100 km/h hıza ulaşma süresidir. Belirlenen elektrik motoru için bu performans değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Taşıtın, düz yol için hareket dirençlerinin tekerlekte oluşturduğu direnç momentlerini yenerek rezerv momentini ivmelenme için kullanması halinde taşıt hızına göre aracın ulaşabileceği maksimum ivme değeri (a) hesaplanmak istenirse:

$$\frac{M_M \cdot i \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}}{r_{dyn}} = \lambda \cdot G \cdot \frac{\ddot{x}}{g} + F_R + F_L \quad (3.59)$$

$$\frac{\ddot{x}}{g} = \frac{\frac{M_M \cdot i \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}}{r_{dyn}} - (F_R + F_L)}{\lambda \cdot G} \quad (3.60)$$

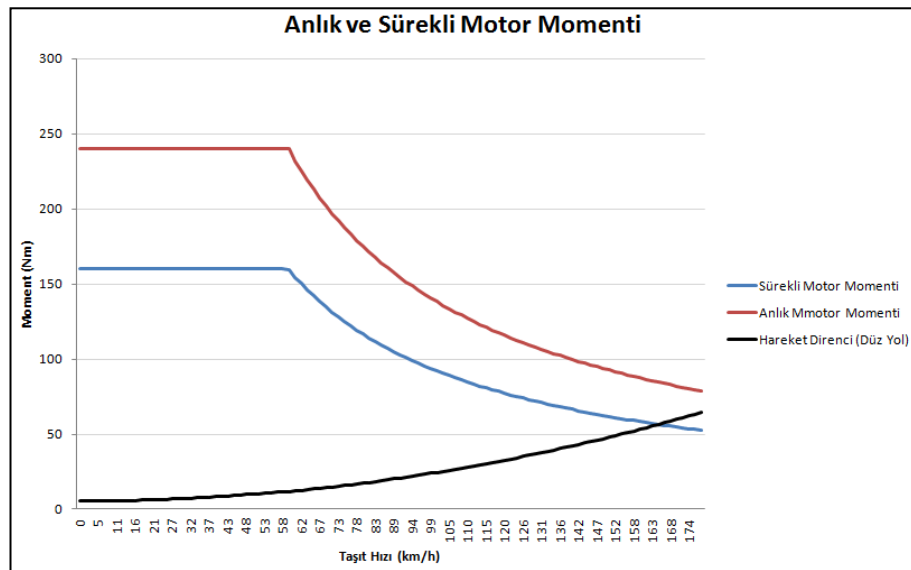
$$a = \ddot{x} = \frac{dV}{dt} = \frac{\frac{M_M \cdot i \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}}{r_{dyn}} - (F_R + F_L)}{\lambda \cdot m} \quad (3.61)$$

Taşıtın ulaşabileceği hesaplanan maksimum ivme değerinin değişimi taşıt hızına göre aşağıdaki gibidir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Taşıtın ulaşabileceği maksimum ivme değeri

Elektrik motorları özellikleri gereği anlık olarak aşırı yüklemeye maruz kalabilmektedirler. Yapılan elektrik motoru tasarımlarında Amerika'da geçerli olan standarda göre 18 saniye boyunca elektrik motorunun %150 yüklemeye dayanması esas alınmaktadır. Seçilen elektrik motorunun da bu yüklemeye dayanacağı ve anlık olarak yüksek moment ve güç vereceği düşünülmelidir (Şekil 34). Aksi takdirde aşırı yükleme olmaksızın hesaplanan 0-100 km/h hızlanma değerleri düşük çıkmaktadır.



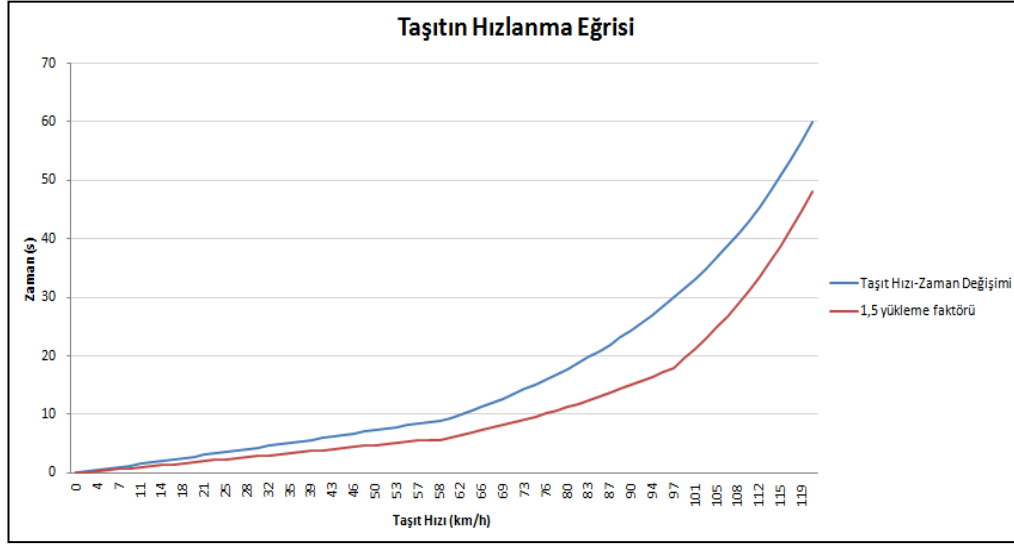
Şekil 3.13 Anlık ve sürekli elektrik motoru momentini

Aracın 0 km/h hızdan 100 km/h hıza ulaşma süresi (t) ve hızlanma anında alınan mesafe (S) için:

$$t = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\lambda \cdot m}{(M_M \cdot i \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM} / r) - f_R \cdot m \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot c_w \cdot V^2} \cdot dV \quad (3.62)$$

$$S = V \cdot t \quad (3.63)$$

$$S = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\lambda \cdot m \cdot V}{(M_M \cdot i \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM} / r) - f_R \cdot m \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot c_w \cdot V^2} \cdot dV \quad (3.64)$$



Şekil 3.14 Taşıtın 0-100 km/h hızlanma kabiliyeti

Yukarıdaki Grafikte de görüldüğü üzere araç, elektrik motorunun anlık aşırı yüklemesi olmaksızın 0-100 km/h hıza 31 saniyede ulaşmakta fakat 18 s boyunca %150 aşırı yükleme ile 0-100 km/h hızlanmayı 20 saniyede tamamlamaktadır.

3.4 Batarya Seçimi

Elektrikli araçlarda batarya kapasitesi doğrudan taşıtın menzili ile alakalı olup batarya kapasitesinin artması menzilin artmasını sağlayacaktır. Elektrikli araçlar bugünkü batarya teknolojisi ve şarj istasyonlarının yaygın olmamasından dolayı şehirlerarası kullanım için efektif değildirler. Tasarlanan aracın şehir içi kullanım için daha uygun olmasından dolayı batarya kapasitesinin yüksek seçilmesi

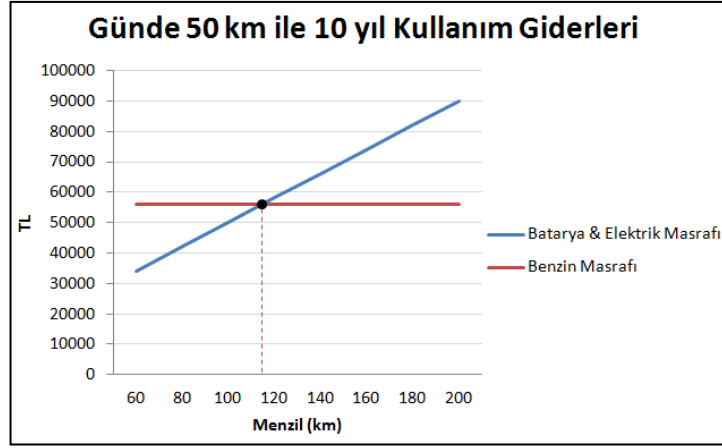
gereksizdir. Batarya kapasitesinin yükselmesi araç ağırlığında ciddi artışa sebep olacağı gibi maliyetin de yükselmesine sebep olacaktır.

Öncelikle batarya kapasitesinin tayininde literatür taranarak binek elektrikli araçlar için yaklaşık olarak 15 kWh kapasitenin 100 km menzili sağlayacağı saptanmıştır (Sauer, 2009). Bu kabulden yola çıkılarak tasarlanan elektrikli araç için batarya kapasitesi ve dolayısıyla araç menzili tayini için optimum değer seçilmelidir. Şehir içi kullanım olarak günde 50 km yol yapılması için elektrikli ve benzinli bir aracın 10 yıl boyunca kullanım maliyeti kabaca irdelenmelidir. Karşılaştırılacak değerler, elektrikli araç için batarya kapasitesine göre batarya maliyeti ile elektrik kullanım gideri ve benzinli araç için de kat edilecek toplam mesafe için benzin maliyetidir. Bu hesaplamalar 12.02.2014 tarihinde geçerli olan aşağıdaki parametreler üzerinden yapılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.2 Batarya seçim parametreleri

Parametre	Değer	Birim
95 oktan Benzin	5,1	TL
Benzin Sarfiyatı	6	lt/100 km
Batarya maliyeti	500	Euro/1kWh
1 Euro	2,96	TL
Elektrik Maliyet	0,37	TL/kWh

Günde 50 km baz alınarak yapılan karşılaştırmada araçlar 10 yıl boyunca toplam 182500 km yol gideceklerdir. Farklı menzillere sahip elektrikli araçlarda toplam alınan yol için elektrik masrafı aynı olacaktır. Yine benzinli araç için de toplam yakıt gideri tablodaki değerlerden yola çıkılarak hesaplanabilir. Fakat elektrikli aracın batarya kapasitesi arttıkça, batarya maliyeti de artmakta, bu durum 1,8 kat gibi bir üreticiden satışa fiyat artırımını da söz konusu olduğu taktirde araç maliyetini de aynı ölçüde arttırmaktadır. Araç alımındaki batarya maliyeti ve 10 yıl süresince tüketilen elektrik ve benzin göz önüne alındığında elektriğin ucuz olması benzinli araca kıyasla ancak yaklaşık 120 km'ye kadarki menzilde elektrikli araca fiyat avantajı sağlamaktadır. Menzilin artmasıyla birlikte artan batarya maliyeti ise elektrikli aracı mali yönden dezavantajlı duruma sokmaktadır (Şekil 3.15).

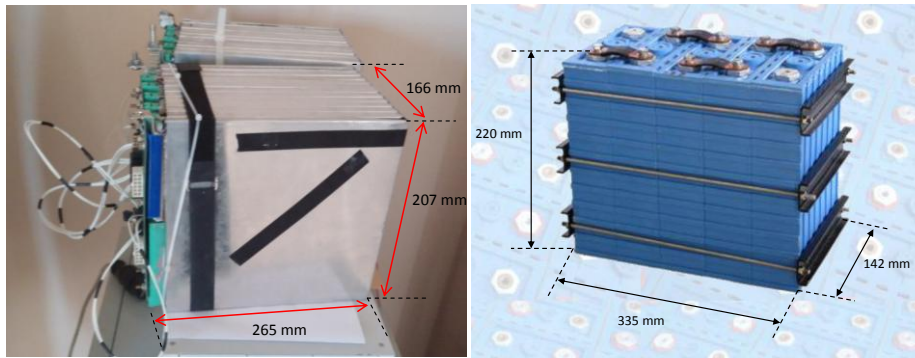


Şekil 3.15 10 Yıllık kullanıma bağlı araç giderleri

Bu sonuçtan yola çıkarak tasarlanacak araç için 120 km menzil olması öngörülmüş ve 18 kWh kapasiteli lityum iyon batarya kullanılması kararlaştırılmıştır. Kullanılacak lityum iyon bataryanın haricinde 2 adet paralel bağlı kurşun asit batarya (1,2 kWh) kullanılmıştır. Bundan dolayı batarya kapasitesi 17 kWh seçilmiş ve menzilin doğruluk hesabı bölüm 4’de yapılmıştır.

Günümüzde hibrit elektrikli ve elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan bataryalar lityum iyon ve NiMH (nikel metal hidrit) bataryalardır. Önceki bölümde bahsedilen nedenlerden dolayı tasarlanan araç için LiFePO_4 (lityum demir fosfat) batarya kullanılması kararlaştırılmıştır.

Bu aşamada kullanılacak bataryanın temini için iki farklı yol ortaya çıkmıştır. Birincisi piyasada mevcut üreticilerden satın alınması yoluyla temini olup % 100 yerli tasarım elektrikli araç temasını zedeleyecek bir seçimdir. İkincisi ise bataryanın Tübitak desteği ile üretimidir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Tübitak işbirliğiyle üretilmiş 11 hücreden oluşan batarya modülü (sağdaki) ve piyasada mevcut 5 hücreden oluşan lityum iyon batarya modülü

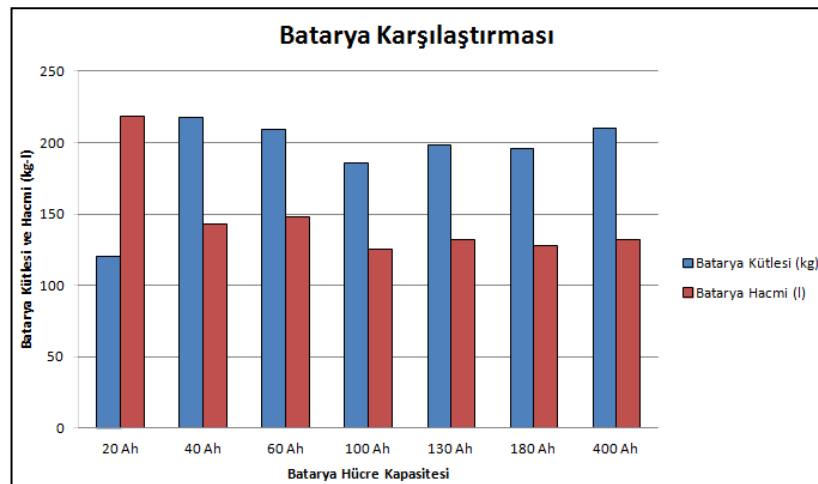
20 Ah hücre kapasiteli olacak şekilde üretilen yerli LiFePO₄ bataryanın hücre ağırlığı 0,455 kg olup diğer alternatife göre daha avantajlı durumda bulunmaktadır. Piyasada satılan bataryaların 40, 60, 100, 130, 180 ve 400 Ah hücre kapasiteli alternatiflerinin bulunması bu 7 farklı batarya için optimum seçimin yapılmasını gerekli kılmaktadır. Q_{Bat} toplam batarya kapasitesi (kWh), $Q_{Hücre}$ hücre kapasitesi (Ah), $n_{Hücre}$ bir modüldeki hücre sayısı ve $V_{Hücre}$ hücre voltajı (V) olmak üzere gerekli batarya modülü sayısı $n_{Modül}$:

$$n_{Modül} = \frac{Q_{Bat}}{V_{Hücre} \cdot n_{Hücre} \cdot Q_{Hücre}} \quad (3.65)$$

Tablo 3.3 Farklı kapasitede bataryaların ağırlık ve hacimleri

LiFePo	$V_{Hücre}$ (V)	$m_{Hücre}$ (kg)	$n_{Hücre}$	$n_{Modül}$	m_{Bat} (kg)	Batarya Hacmi (l)
20 Ah	3.2	0.455	11	24	120.12	218.54232
40 Ah	3.2	1.5	5	29	217.5	143.1382
60 Ah	3.2	2.2	5	19	209	148.39
100 Ah	3.2	3.1	5	12	186	125.5848
130 Ah	3.2	4.4	5	9	198	132.11289
180 Ah	3.2	5.6	5	7	196	127.99241
400 Ah	3.2	14	5	3	210	132.273

Batarya modüllerinin boyutları göz önüne alındığında (Tablo 3.2) gerekli batarya hacmi ve ağırlığı hesaplanabilir. Aşağıdaki grafikte de (Şekil 3.17) görüldüğü gibi hacim olarak dezavantajlı olmasına karşın 20 Ah kapasiteli bataryanın ağırlık olarak en uygun seçenek olduğu söylenebilir.



Şekil 3.17 Farklı batarya kapasiteleri için kütle ve hacim karşılaştırması

Seçilen LiFePO₄ (LFP) batarya hücrelerinin kapasitif parametreleri ve şarj-deşarj durumundaki özellikleri aşağıdaki tablolarda (Tablo 3.3 ve 3.4) gösterilmiştir.

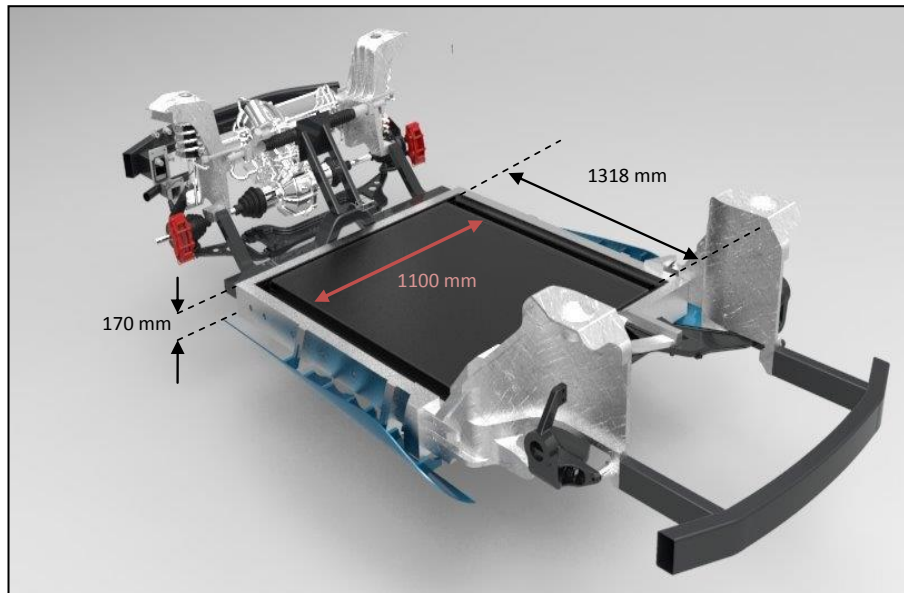
Tablo 3.4 Seçilen bataryanın kapasitif özellikleri

Batarya	Anma Kapasitesi	Spesifik Enerji (Wh/kg)	Enerji Yoğunluğu (Wh/l)	Spesifik Güç (W/kg)	Hücre Ağırlığı (kg)	Anma Voltajı (V)	Çevrim Ömrü	DC İç Direnç ($\mu\Omega$)
LFP	20 Ah (0,3 C Deşarjda)	140	250	840	0,455	3,2	2500 Çevrim	3

Tablo 3.5 Seçilen bataryanın şarj vedeşarj durumu özellikleri

Şarj		Deşarj		Şarj Zamanı		Çalışma Sıcaklık Aralıkları	
Max Şarj Akımı (devamlı)	Şarj Kesme Voltajı (V)	Max Deşarj Akımı (devamlı)	Deşarj Kesme Voltajı (V)	Standart	Hızlı	Şarj	Deşarj
2C	3,65	3C	2,5	4 saat	1 saat	(0/+45 °C)	(-20/+55 °C)

Kullanılacak batarya grubunun araç zemininde ayrılmış yere sığabilmesi de büyük önem arz etmektedir (Şekil 3.18). Bu sayede batarya zemine yakın bir bölgede konumlandırılarak aracın ağırlık merkezinin yüksekliğinin azalması ve bu sayede aracın yalpa davranışının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.18 Batarya yerleşimi için araç zeminindeki faydalı yer

Kullanılan bataryanın bir özelliği de yatay konumda çalışabilme olanağının olmasıdır. Bu sayede bataryanın yerleşimi için araç zeminine 170 mm yüksekliğinde bir çerçevenin yapılması yeterli olacaktır. 24 adet modül yatay olarak 4 adet enine ($4 \times 265 = 1060$ mm) ve 6 adet boyuna ($6 \times 207 = 1242$ mm) olmak üzere yerleştirildiği taktirde araç için tasarlanan enine 1100 mm ve boyuna 1318 mm olan çerçeveye yerleştirilebilecektir.

Tüm batarya grubunun zemine yerleştirilebilmesi ve aracın bagaj hacminde batarya nedeniyle daralma olmaması tasarım hedeflerinden birisidir. Bu sayede batarya hacminin büyüklüğünden kaynaklanan dezavantaj giderilmiş ve kullanılabilir araç hacminde azalma önlenmiş olur. Ayrıca zeminde bulunan bataryalar ağırlığı nedeniyle araç ağırlık merkezinin konumunu aşığıya çekecek ve aracın dinamik davranışını iyileştirecektir.

BÖLÜM DÖRT

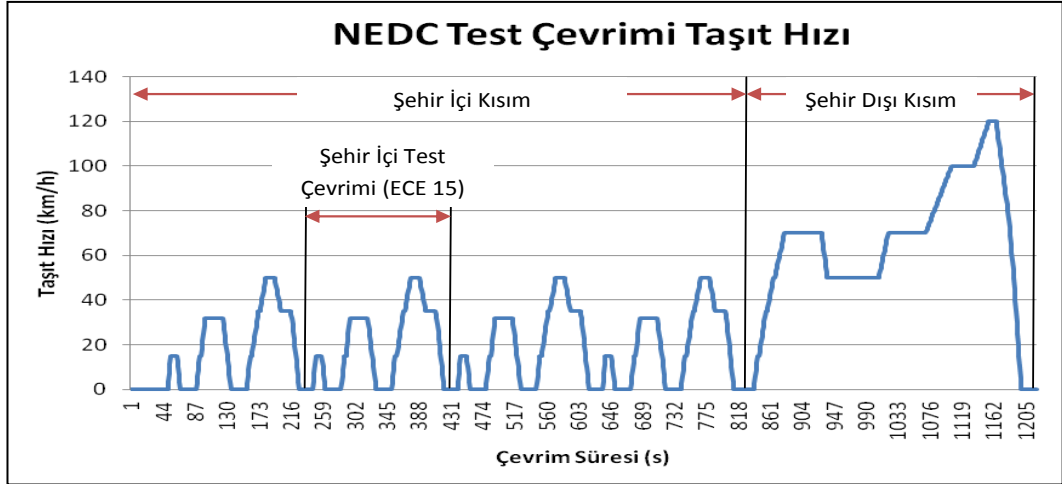
MODELİN ŞEHİR TEST ÇEVİRİMLERİNE GÖRE ANALİZİ

4.1 Şehir Test Çevrimleri

Taşıtlar, kullanıldıkları süre zarfında düzensiz ve öngörülmesi zor seyir koşullarında hareket ederler. Bu değişken seyir rotaları boyunca araçların güç ihtiyacı, yakıt yada elektrikli araçlar için enerji tüketimi ve yine konvansiyonel araçlar için egzoz emisyon değerleri gibi seyir parametrelerinin analizi için önceden hazırlanmış standart veya standart olmayan test çevrimleri oluşturulmuştur. Bu çevrimler haftanın farklı günlerinde ve günün farklı saatlerinde veriler toplanarak ve belirli güzergâhlar kullanılarak o bölgeye en uygun hız karakteristikleri elde edilir.

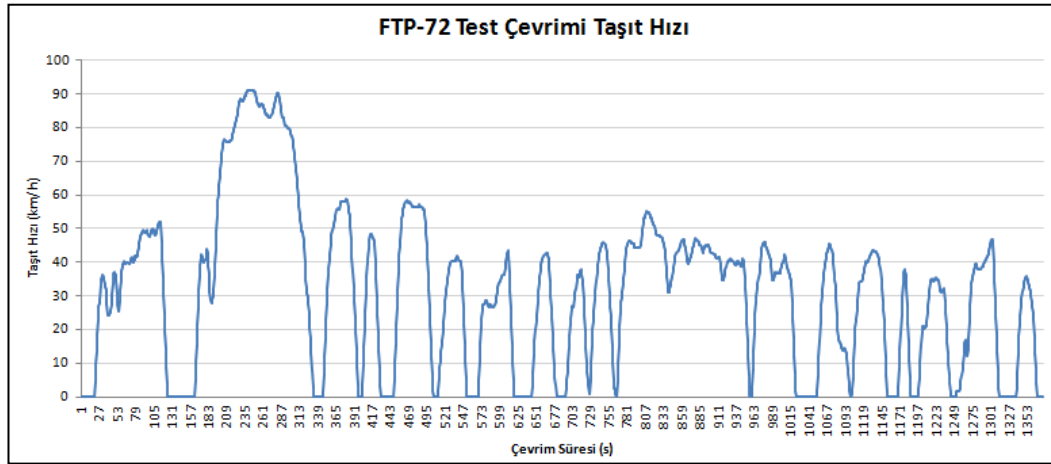
Seyir çevrimleri genel olarak iki gruba ayrılırlar. Standart çevrimler, üretilen araçların tip onayı alabilmeleri için emisyon ve yakıt tüketim değerlerinin standart ölçütlerle belirlenebildiği çevrimlerdir. Bu grupta temel olarak Avrupa Test Çevrimi (New European Driving Cycle-NEDC) ve Amerikan Test Çevrimi (Federal Test Procedure-FTP 75-FTP 72) yer almaktadır. Standart olmayan çevrimler ise belirli ülke, şehir veya taşıt tipine göre yine yakıt tüketimi, emisyon ve hibrit uygulamaları için araştırma ve geliştirme amaçlı kullanılan çevrimlerdir. Bu gruba ise örnek olarak Hong Kong, Sidney ve bu tez kapsamında kullanılan İstanbul Şehir Çevrimi (Istanbul Drive Cycle-IDC) verilebilir.

Ülkemiz için en önemli ve testinin yapılması gerekli olan çevrim NEDC çevrimidir. NEDC test çevrimi 1184 saniye sürede 10,93 km yol kat edilen 13 adet duraklama ile ortalama hızın 33,21 km/h olduğu test çevrimidir. Aşağıdaki NEDC çevrimine ait hız zaman grafiğinde (Şekil 4.1) görüldüğü gibi arka arkaya 4 adet ECE 15 şehir içi çevrimi ve sonrasında 1 adet otoyol çevriminin eklenmesiyle NEDC çevrimi oluşturulmuştur.



Şekil 4.1 NEDC Test çevrimi

Tez kapsamında kullanılacak diğer test çevrimi ise FTP 72 yada diğer adıyla UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) olup 12.07 km menzile sahiptir. Maksimum hızı 91.25 km/h ve ortalama hızı 31.5 km/h olan bu çevrime ait hız-zaman grafiği aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 FTP-72 Test çevrimi

Türkiye koşullarına daha uygun olması açısından değerlendirildiğinde İTÜ'den Prof. Dr. Cem Soruşbay ve arkadaşları tarafından oluşturulan İstanbul Şehir çevrimi, trafiğin ve nüfus yoğunluğunun fazla olduğu İstanbul adına daha sağlam sonuç verecektir. Bu bağlamda tasarımı ve analizi yapılacak bir aracın ülkemiz koşullarına en uygun halde testinin yapılması adına tez kapsamında bu çevrim de kullanılmıştır. Toplam uzunluğu 8,61 km ve çevrim süresi 1003 saniye olan İstanbul Şehir

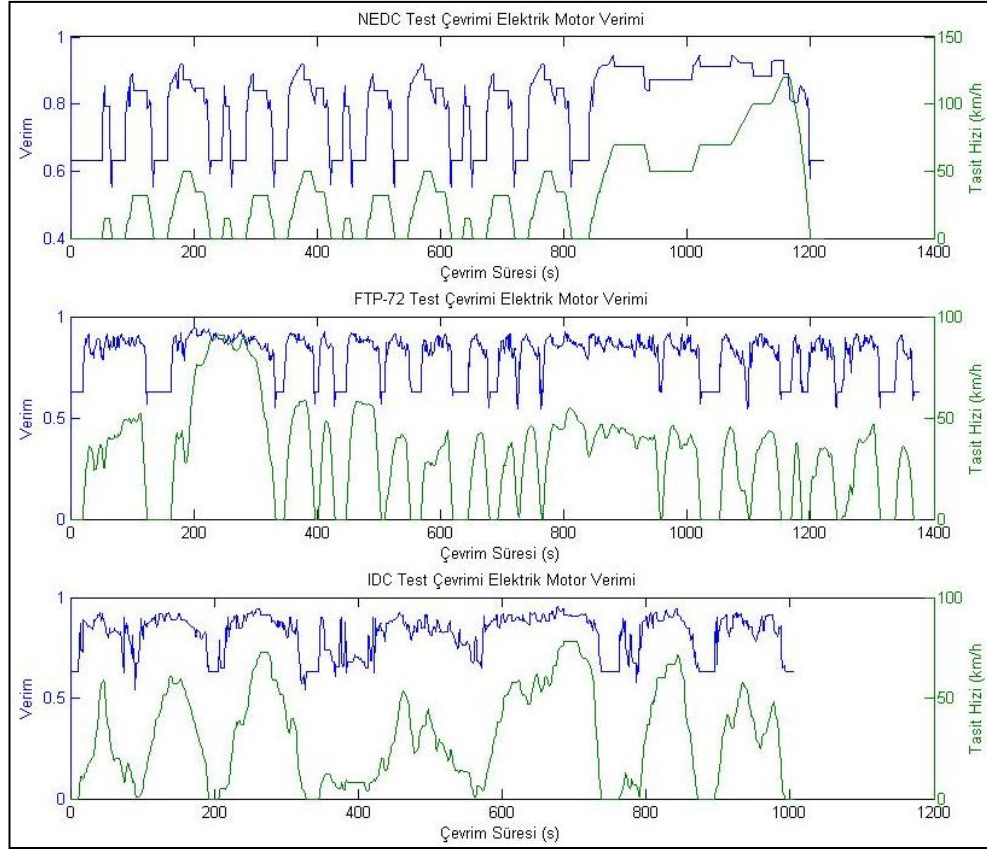
Çevriminin çevrim süresince maksimum hızı 78 km/h ve ortalama hızı ise 30,9 km/h'tir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 İstanbul şehir çevrimi

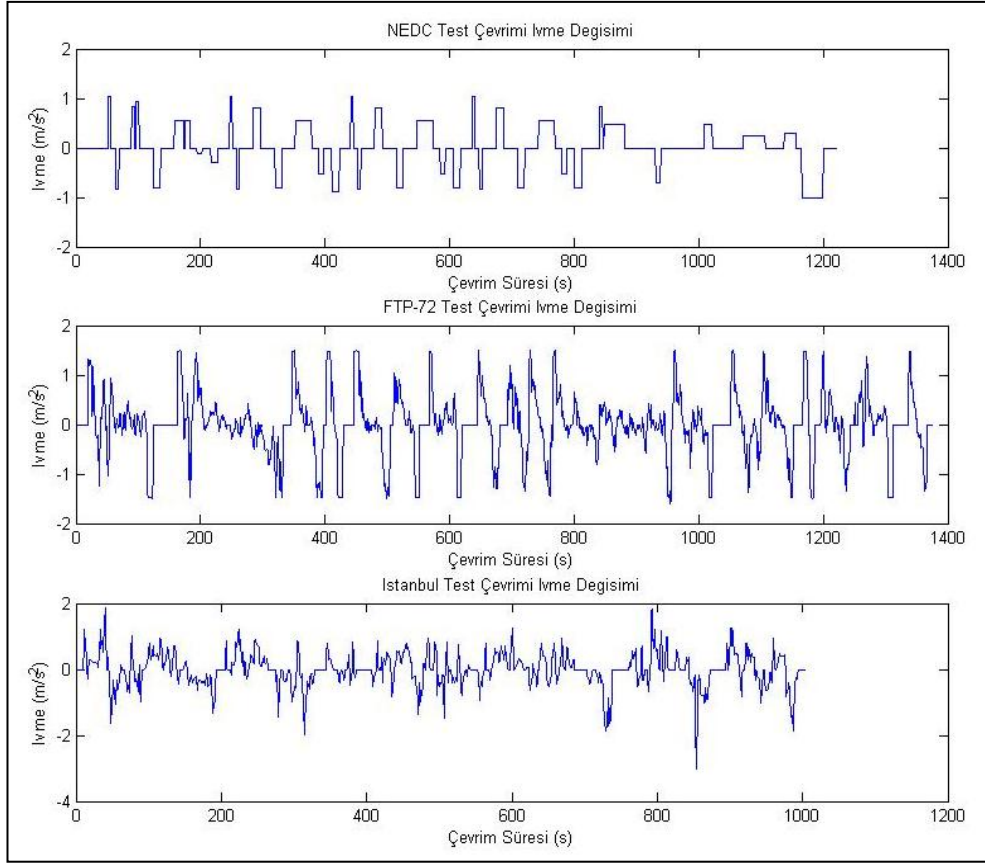
4.2 Taşıtın Çevrimlere Göre Analizi

Bir taşıtın motorunda gerekli güç ve moment değerleri o taşıta etkiyen yol dirençlerinin bir fonksiyonudur. Bölüm ikide detaylandırılmış olan yuvarlanma, rüzgar ve ivme direnci, şehir çevrimi dolayısıyla değişken olan hızlarda taşıtın gerekli güç ve momentini belirler. Bölüm üçteki araç verilerinin kullanılması ile bir test çevriminde motordaki, bataryadaki gerekli güç bulunarak batarya akımının ve SOC değişiminin hesabı yapılabilmektedir. Bunun için çevrim süresince taşıt hızından başka ivmelenme ve araç önden tahrikli olduğundan negatif ivmelenme durumunda depolanacak fren enerjisini hesaplamak için ideal fren kuvveti oranı (i_F) gibi diğer değişken parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca kullanılan elektrik motorunun verim karakteristiği bölüm birde gösterilen grafikteki gibidir (Şekil 4.4). Test çevrimlerinde taşıt hızının değişimine bağlı olarak elektrik motoru veriminin değişimi aşağıdaki grafikteki gibidir.



Şekil 4.4 Kullanılan elektrik motorunun veriminin değişimi

Test çevrimleri süresince değişen hıza bağlı olarak ivme de değişmektedir. Taşıtın hareketine negatif yönde hareket eden tahrik ivmesi ve fren esnasında depolanacak enerjiyi oluşturan frenleme ivmesinin belirlenmesi önemlidir. Kullanılan çevrimlere ait ivme değişimleri aşağıdaki şekilde gibidir (Şekil 4.5). Grafikteki pozitif bölge taşıtın hızlanmadan dolayı oluşan ivmeyi gösterirken negatif kısım frenleme durumunu ifade etmektedir. Frenleme durumunda bu ivmenin oluşturduğu güç değeri tekerleklerden bataryaya kadar oluşan tahrik hattında ilerleyerek bataryada depo edilir.



Şekil 4.5 Test çevrimlerinin seyir süresince ivme değişimleri

Aracın aks mesafesi (L) 2,511m ve ağırlık merkezinin yüksekliği (h) 0,57 m alınarak ağırlık merkezinin ön ve arka aksın tam ortasında olduğu ($L_{\dot{O}}/L=G_{\dot{O}}/G=0.5$) kabul edildiği takdirde ideal fren kuvveti oranı ($i_F=B_{\dot{O}}/B_T$) değişimini hesaplamak için ön ve arka aks dinamik yükleri ($G_{\dot{O}}^*$, G_A^*) yazılarak ön ve arka aks fren kuvvetlerinin ($B_{\dot{O}}$, B_A) tarif edilmesi gerekmektedir. Ön ve arka akstaki kuvvet bağıntı katsayıları ($f_{\dot{O}}$, f_A), tekerlek yol arası tutunma katsayısı (μ) ve frenleme oranı (z) ifadeleri kullanılarak:

$$B_{\dot{O}} = f_{\dot{O}} \cdot G_{\dot{O}}^* \quad (4.1)$$

$$B_A = f_A \cdot G_A^* \quad (4.2)$$

$$X = \frac{h}{L} \quad (4.3)$$

$$\Psi = \frac{L_{\dot{O}}}{L} = \frac{G_A}{G} \quad (4.4)$$

$$\frac{B_{\ddot{O}}}{G} = f_{\ddot{O}} \cdot (1 - \Psi + z \cdot X) \quad (4.5)$$

$$\frac{B_A}{G} = f_A \cdot (\Psi - z \cdot X) \quad (4.6)$$

İdeal durumda $\mu=f_{\ddot{O}}=f_A=z$ olmak üzere:

$$B_{\ddot{O}} + B_A = \mu \cdot (G_{\ddot{O}}^* + G_A^*) = z \cdot G \quad (4.7)$$

$$\frac{B_{\ddot{O}}}{G} = z \cdot (1 - \Psi + z \cdot X) \quad (4.8)$$

$$\frac{B_A}{G} = z \cdot (\Psi - z \cdot X) \quad (4.9)$$

Yukarıdaki 8 ve 9 numaralı eşitliklerin tek bir denklemde yazılarak z ifadesinin çekilmesiyle 2 köke sahip z ifadesi:

$$z_{1,2} = -\left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right) \mp \sqrt{\left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right)^2 + \frac{1}{X} \cdot \frac{B_{\ddot{O}}}{G}} \quad (4.10)$$

$$\frac{B_A}{G} = \mp \sqrt{\left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right)^2 + \frac{1}{X} \cdot \frac{B_{\ddot{O}}}{G}} - \left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right) - \frac{B_{\ddot{O}}}{G} \quad (4.11)$$

Toplam fren kuvveti (B_T), ön ve arka aks fren kuvvetleri toplamına eşit olacağından:

$$\frac{B_T - B_{\ddot{O}}}{G} = \sqrt{\left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right)^2 + \frac{1}{X} \cdot \frac{B_{\ddot{O}}}{G}} - \left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right) - \frac{B_{\ddot{O}}}{G} \quad (4.12)$$

$$\frac{B_T}{G} = \sqrt{\left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right)^2 + \frac{1}{X} \cdot \frac{B_{\ddot{O}}}{G}} - \left(\frac{1 - \Psi}{2 \cdot X}\right)$$

(4.13)

Toplam fren kuvveti (B_T) şekil...’de gösterilen şehir çevrimlerindeki taşıtın negatif ivme değerine (a^-) bağlıdır. Çevrim süresine bağlı olarak frenlemenin olduğu durumlarda toplam fren kuvveti:

$$B_T = m \cdot a^- \quad (4.14)$$

Yukarıdaki eşitlikte (denklem 15) $B_{\dot{O}}/B_T$ ifadesi çekilmek suretiyle fren kuvveti dağılım oranı (i_F) bulunabilir.

$$i_F = \frac{B_{\dot{O}}}{B_T} \quad (4.15)$$

4.2.1 Elektrik Motoru ve Batarya Gücünün Değişimi

Düz yol koşulu için oluşturulmuş NEDC, FTP-72 ve İstanbul Şehir Çevrimleri süresince motorda gerekli olan güç; yuvarlanma direnci, hava direnci ve ivmelenme direncinin oluşturduğu kuvvetlerin yenilmesi için gerekli olan güçtür. Buna göre bölüm üçte verilen taşıt değerleri kullanılmak üzere, fren enerjisinin geri kazanımı olmadan test çevrimleri süresince gerekli motor gücü (P_M):

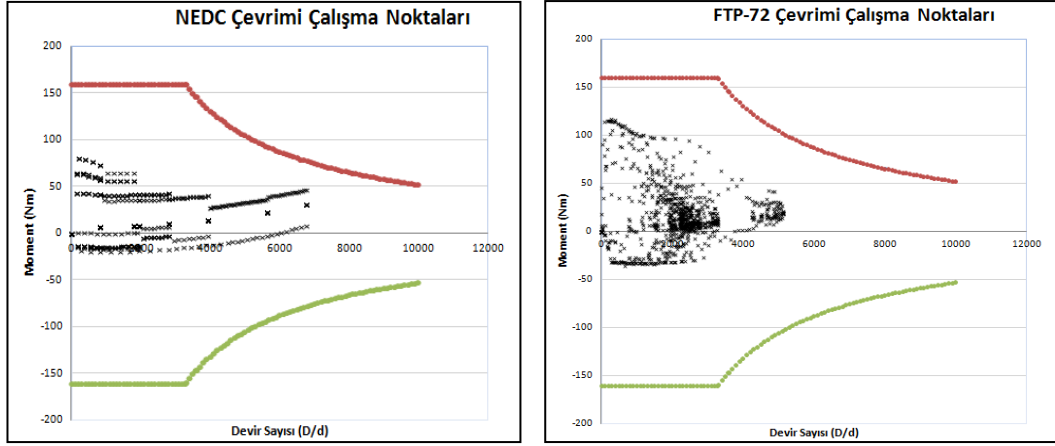
$$P_M = \frac{(m \cdot g \cdot f_R + \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot C_W \cdot V^2 + \lambda \cdot m \cdot a^+) \cdot V}{1000 \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}} \quad (4.16)$$

Gerekli motor gücü fren enerjisini geri kazanımı (rekuperasyon) olması halinde aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_M = \frac{(m \cdot g \cdot f_R + \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot C_W \cdot V^2 + \lambda \cdot m \cdot a^+ + \lambda \cdot m \cdot a^- \cdot \eta_M^2 \cdot \eta_{EM}^2 \cdot i_F) \cdot V}{1000 \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}} \quad (4.17)$$

Yukarıdaki güç formülünden yola çıkarak test çevrimleri için elektrik motorunda gerekli moment (M_M), taşıt hızının motor devir sayısına (n_M) çevrilmesiyle bulunabilir (denklem 18). Bu bağıntıdan yola çıkarak NEDC ve FTP-72 test çevrimleri çalışma noktaları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.6)

$$M_M = \frac{P_M \cdot 9549}{n_M} \quad (4.18)$$

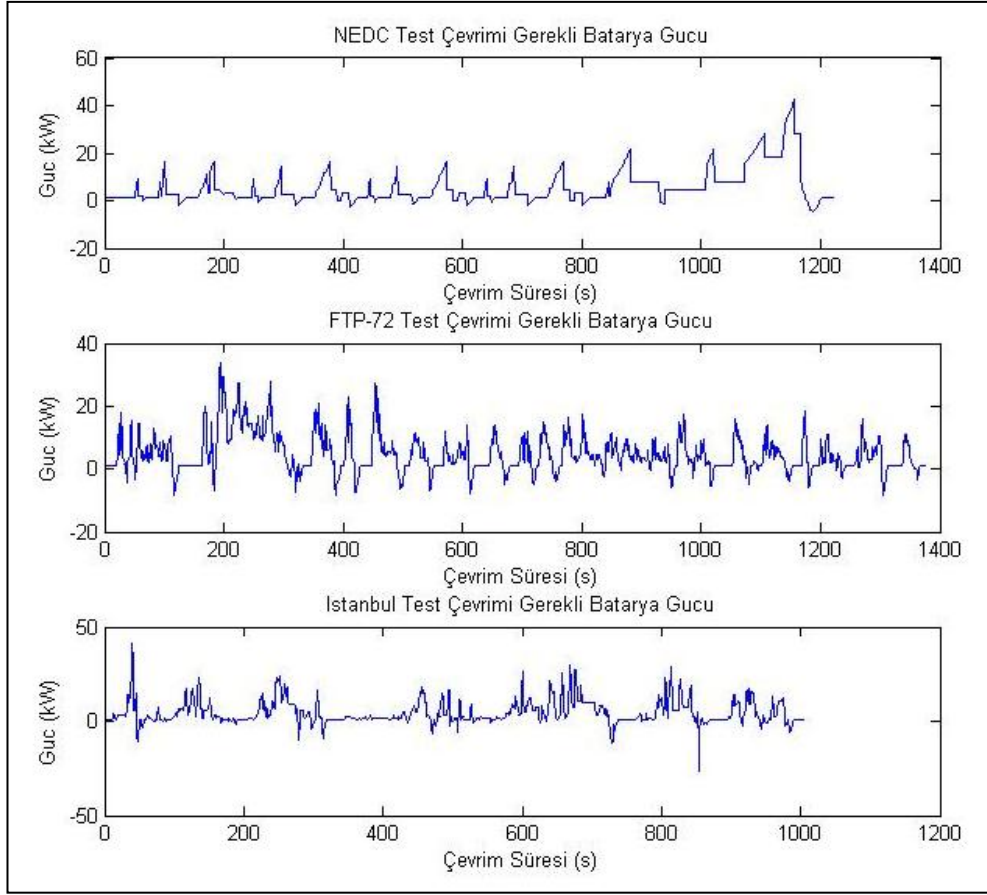


Şekil 4.6 NEDC (soldaki) ve FTP-72 (sağdaki) Test çevrimleri çalışma noktaları

Yoldan gelen direnç kuvvetlerinin oluşturduğu elektrik motoru güç gereksinimine ilaveten batarya, aracın radyo, klima, araç aydınlatma ışıkları gibi iç ihtiyacını da karşılamaktadır. Bu iç güçler 700 W ile 900 W arasında değişmektedir. Bu çalışma kapsamında 857 W'lık bir iç gücün ($P_{iç}$) olduğu varsayılarak gerekli batarya gücüne ulaşılmıştır. Buna göre çevrim boyunca bataryadaki güç (P_B) değişimi [kW] aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_B = \frac{P_M}{\eta_B} + \frac{P_{iç}}{1000 \cdot \eta_B} \quad (4.19)$$

Bu formülden (4.19) yola çıkarak kullanılan test çevrimleri için gerekli batarya güçleri hesaplanmıştır (Şekil 4.7). Burada PM elektrik motoru gücü için fren enerjisinin depo edilebildiği eşitlik (4.17) kullanılmıştır. Batarya güç gereksinimi eğrisinin negatif bölgesi altında kalan alan bataryaya şarj edilen enerji miktarını ifade etmektedir.



Şekil 4.7 NEDC, FTP-72 ve IDC Test çevrimleri gerekli batarya gücü

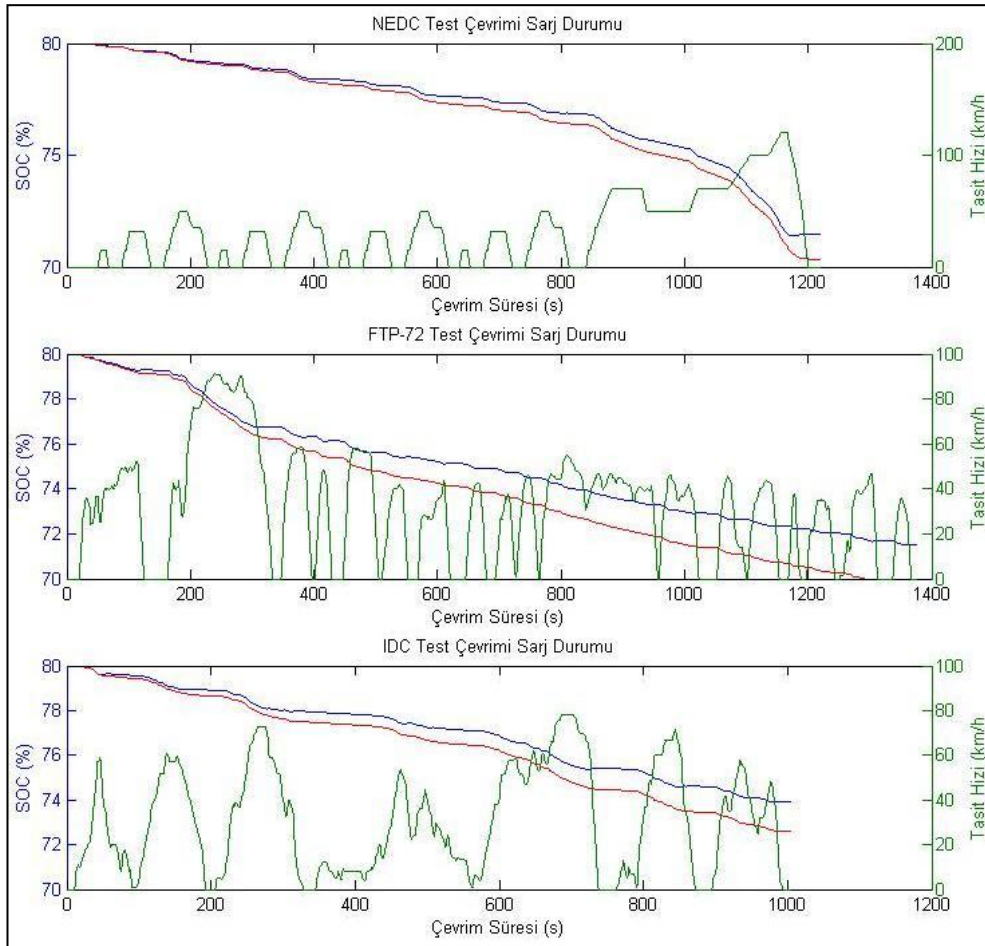
4.2.2 Batarya Doluluk Oranı (SOC) ve Akımının Değişimi

Hibrit elektrikli ve salt elektrikli araçlarda batarya yönetimi ve anlık olarak SOC durumunun belirlenmesi ve izlenmesi önemli bir husustur. Batarya doluluk oranının doğrudan ölçümü yapılamayıp batarya ile ilgili elektriksel ve kimyasal olarak ancak bataryanın matematiksel modellenmesi vasıtası ile yaklaşık olarak hesap yapılabilir. Bu çalışmada gerekli batarya akımının değeri ve çevrim süresince SOC durumunda meydana gelen değişmelerin hesaplanması, bölüm ikide anlatılmış olan Rint batarya modeli ile yapılmıştır.

Seçilen batarya kapasitesi (Q_{Bat}) 17 kWh için başlangıç SOC değeri (SOC_{int}) %80 olarak alınmıştır. Çevrimin ilk saniyesi sonrası kalan SOC değerini hesaplamak için ($n=1$) $SOC_0 = SOC_{int}$ olmak koşulu ile çevrimin başından ($n=1$), çevrimin sonuna (n) kadar geçen zaman dilimindeki SOC'deki azalmanın bir önceki durumdan çıkarılmasıyla yüzde SOC değişimi genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$SOC = \int_0^t \frac{Q_{Bat} \cdot \frac{SOC(t) - P_B(t)}{SOC_{int} \cdot 3600}}{Q_{Bat} \cdot \frac{SOC(t)}{SOC_{int}}} \cdot SOC(t) \cdot 100 \cdot dt \quad (4.20)$$

Yukarıdaki eşitlikte güç ifadesi yerine denklem 16 veya denklem 17’de bulunan rekuperasyonlu ve rekuperasyonsuz motor gücünün kullanılmasıyla elde edilen gerekli batarya gücü kullanılarak her iki durumda SOC değerinin çevrim süresince değişimi karşılaştırılabilir. Test çevrimleri için taşıt hızıyla birlikte SOC değişimi her iki durum için aşağıdaki grafikte verilmiştir.



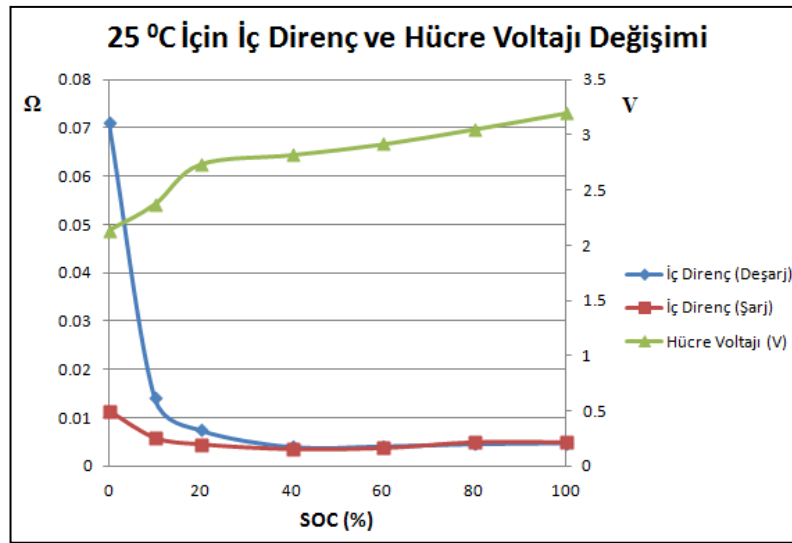
Şekil 4.8 Test çevrimleri boyunca soc değişimi

Çevrim süresince gerekli batarya gücüne göre bataryadan akım çekilmesi söz konusudur. Çekilen bu deşarj akımının yanı sıra fren enerjisinin geri kazanıldığı negatif ivmelenme durumunda ise bataryadan çekilen akımın işareti negatif olacaktır.

Yani bu anlarda batarya şarj edilmektedir. Bölüm ikide tanıtılmış olan batarya modellerinden Rint modeli kullanılarak batarya akımı (denklem 21) hesaplanmıştır.

$$i_{desarj} = \frac{v - \sqrt{v^2 - 4 \cdot R \cdot P(t)_{desarj}}}{2 \cdot R} \quad (4.21)$$

Fakat bölüm birde de anlatıldığı gibi yukarıdaki denklemde yer alan batarya voltajı (v) ve batarya iç direnci (R) gibi ifadeler SOC ve sıcaklık gibi bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklığın değişmediği varsayılarak SOC'ye bağlı olarak değişimi göz önüne alındığında aşağıdaki gibi bir değişim gözlenmektedir.



Şekil 4.9 Lityum iyon bataryada hücre voltajı ve batarya iç direnci değişimi

Yukarıdaki değişiklikleri, 0,003 Ω batarya direnci için SOC'ye göre matematiksel olarak ifade edecek olursak:

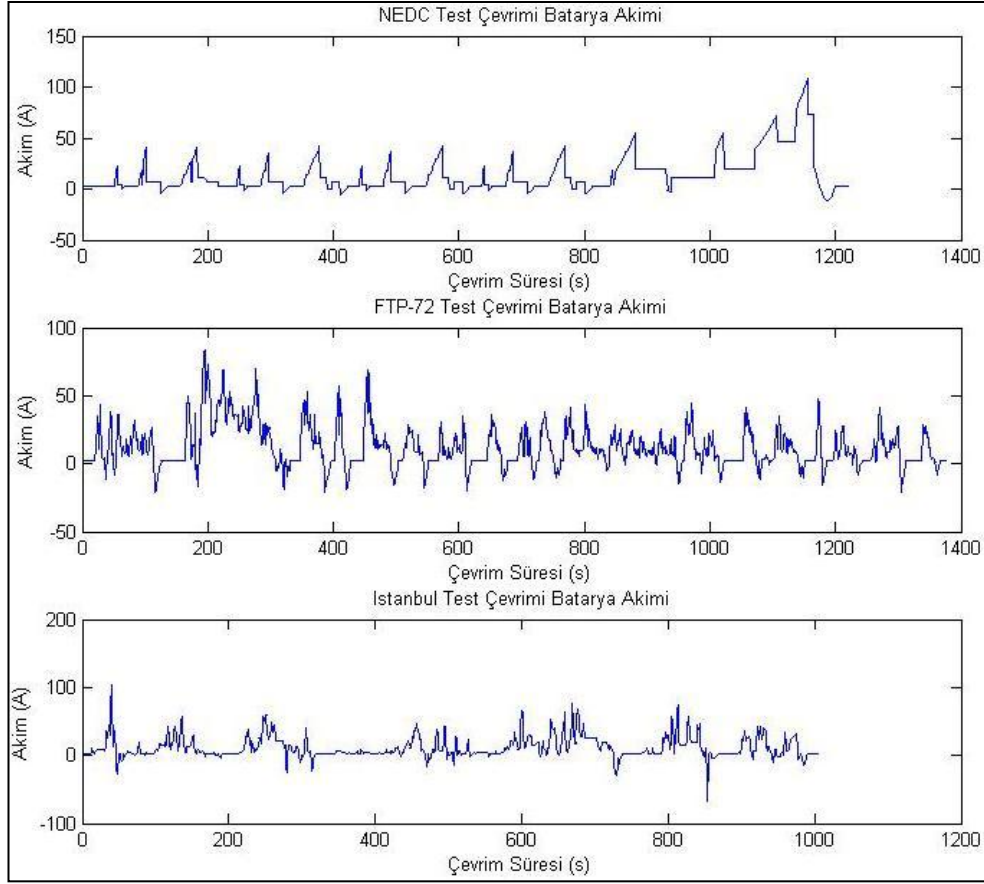
$$R_{şarj} = -0,3306x^5 + 0,884x^4 - 0,8833x^3 + 0,4181x^2 - 0,0955x + 0,0122 \quad (4.22)$$

$$R_{desarj} = 10,1791x^6 - 31,8588x^5 + 38,6412x^4 - 23,0181x^3 + 7,0614x^2 - 1,071x + 0,071 \quad (4.23)$$

$$v = -16,8109x^5 + 37,3296x^4 - 24,315x^3 + 1,8055x^2 - 3,0674x + 2,1199 \quad (4.24)$$

Batarya gücünün pozitif olduğu durumlardadeşarj durumu iç direnci (R_{desarj}) ve batarya gücünün negatif olduğu durumlarda (Şekil 4.9) ise şarj durumu iç direnci

($R_{\text{şarj}}$) kullanılması halinde batarya hücre voltajı değişimini de göz önüne alarak denklem 20'ye göre akım hesaplanmıştır.

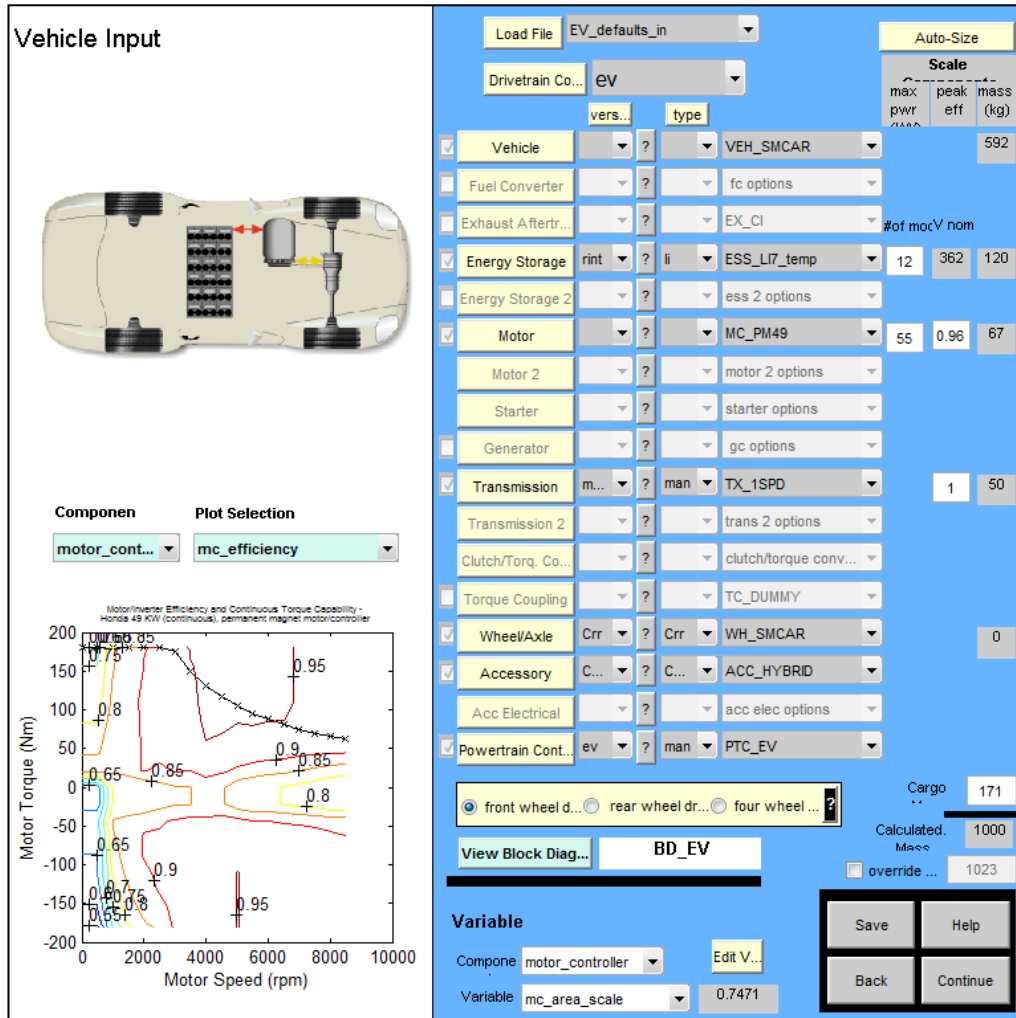


Şekil 4.10 NEDC, FTP-72 ve IDC Test çevrimleri gerekli batarya akımı

4.3 Sonuçların Advisor ile Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında şimdiye kadar yapılan çalışmalar özellikle batarya gücü, akımı ve SOC değişiminin kıyaslanması için Advisor (Advanced Vehicle Simulator) kullanılmıştır. Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL-National Renewable Energy Laboratory) tarafından 1994 yılında geliştirilen bu program ile konvansiyonel, hibrit elektrik, salt elektrik ve yakıt hücreli araçların tahrik sisteminin benzetimi yapılabilmektedir. Büyük araba üreticilerinin ve üniversitelerin kullanması ve programı geliştirmesiyle birlikte uluslar arası düzeyde büyük öneme ulaşmış bu program ülkemizde henüz çok yaygın kullanım alanı kazanamamıştır.

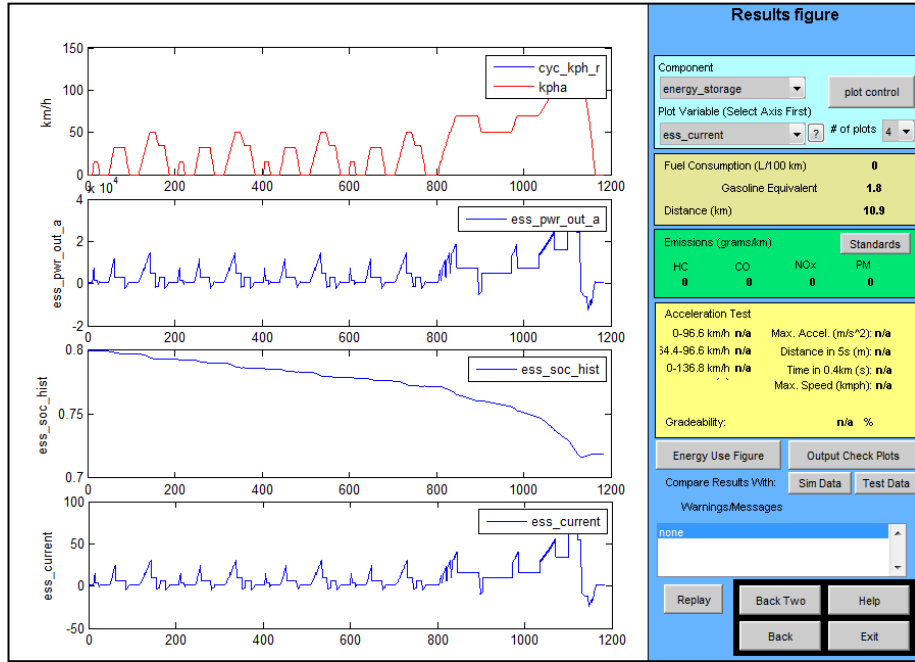
Advisor, Matlab programı ile Simulink kullanılarak oluşturulan bir yazılımdır. Bu program ile tasarımı yapılan veya test edilecek aracın, gerçek bir test aracına ihtiyaç duyulmadan performans kriterlerinin, yakıt ekonomisinin ve emisyon değerlerinin belirlenmesi ve mümkündür. İlk giriş ekranı ile tasarlanan araca ait motor, batarya ve araç özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Sistemde kayıtlı tabi mıknatıslı senkron elektrik motoru ve lityum iyon batarya gibi bileşenlere ait özelliklerin, kapasite ve boyutsal olarak tasarlanan şekilde girilmesiyle ilk adım tamamlanmış olur (Şekil 4.11).



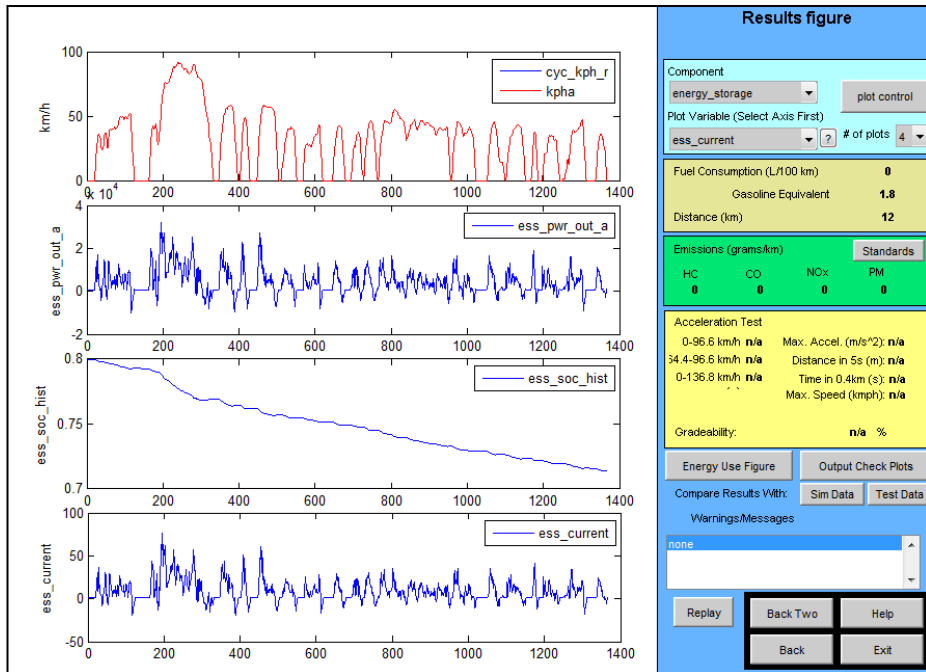
Şekil 4.11 Advisor ekran görüntüsü-tasarım parametrelerinin girişi

İkinci giriş ekranı aracılığıyla analizi yapılacak olan NEDC ve FTP-72 test çevrimleri seçilerek program çalıştırılır. Program ile sürüş süresi boyunca bütün moment, hız, güç, akım değerleri ile kayıplar izlenebilmektedir. Sonuç ekranında araç üzerinde hangi testler yapılacaksa "componet" sekmesinden seçilebilir.

Karşılaştırılacak sonuçlar, sonuç ekranında üst üste dört grafikte gösterilmiştir. En üstteki taşıtın çevrim boyunca hız değişimini (km/h), ikinci sıradaki grafik bataryadan çekilmesi gereken gücü (kW), üçüncü sıradaki grafik SOC değişimini ve en alttaki ise batarya akımının (A) değişimini göstermektedir. NEDC (Şekil 4.12) ve FTP-72 (Şekil 4.13) çevrimleri için sonuçlar aşağıdaki grafiklerdeki gibidir.

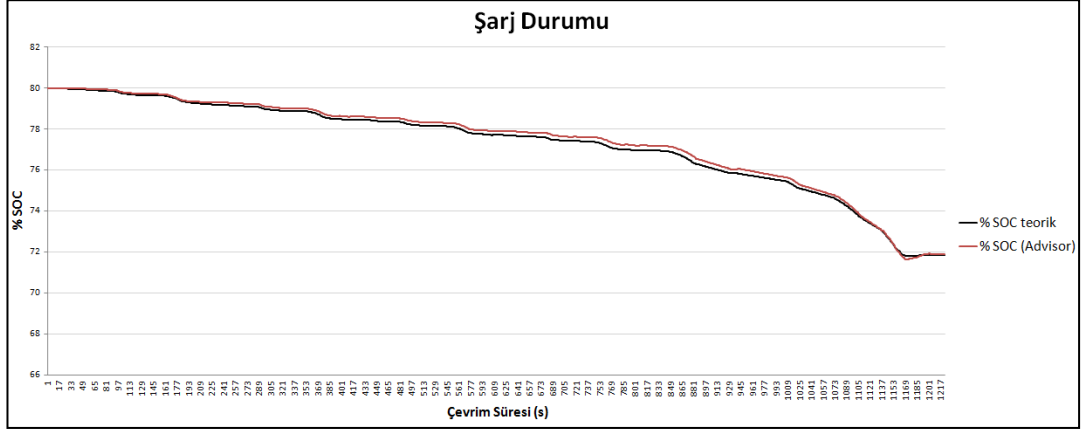


Şekil 4.12 NEDC Test çevrimi için sonuç ekranı

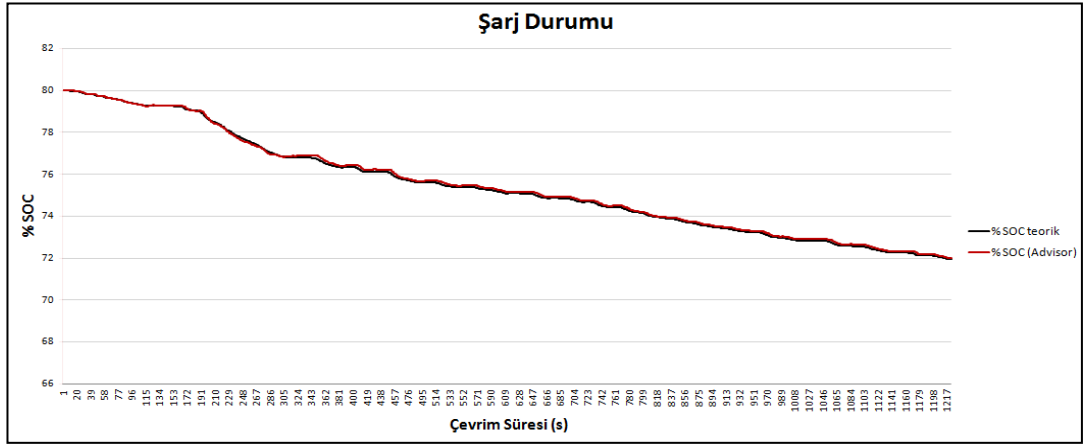


Şekil 4.13 FTP-72 Test çevrimi için sonuç ekranı

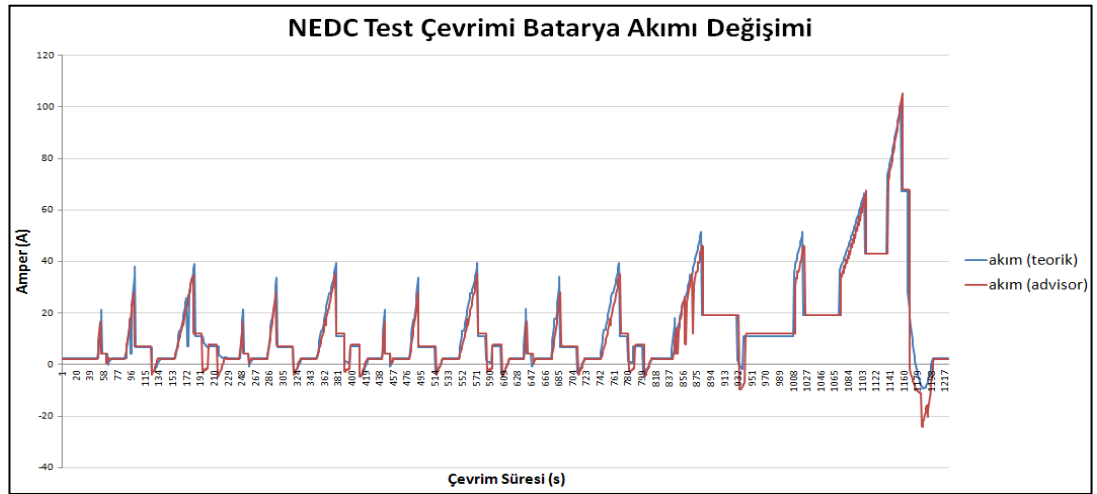
Teorik olarak hesaplanan SOC ve batarya akımı değişimlerinin Advisor çıktıları ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Buna göre aşağıdaki grafiklerden de görüleceği üzere sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır (Şekil 4.14, 4.15, 4.16, 4.17).



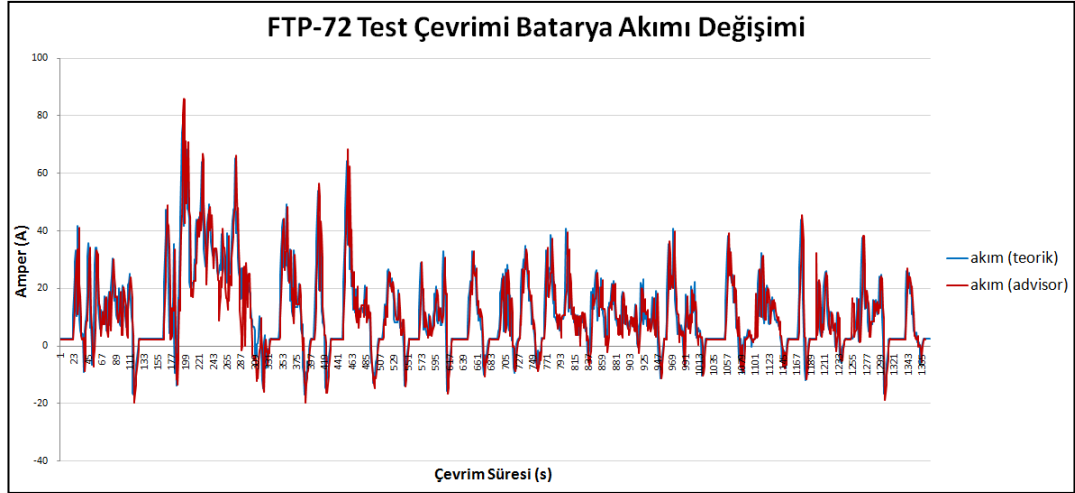
Şekil 4.14 NEDC Test çevrimi SOC değişimi karşılaştırması



Şekil 4.15 FTP-72 Test çevrimi SOC değişimi karşılaştırması



Şekil 4.16 NEDC Test çevrimi batarya akımı değişimi karşılaştırması



Şekil 4.17 FTP-72 Test çevrimi batarya akımı değişimi karşılaştırması

4.4 Enerji Sarfiyatı ve Menzil Hesabı

Elektrikli araçlar için önemli bir karşılaştırma kriteri de enerji sarfiyatı (kWh/100km) değeridir. Değişen test çevrimi süresince bataryadan talep edilen güç eğrisinin altında kalan alan bataryadan çekilen enerjiyi ifade etmektedir. Buna göre bir çevrimde bataryadan çekilen enerji ($Q_{\text{çevrim}}$):

$$Q_{\text{çevrim}} = \frac{\int_0^n P_B \cdot dt}{3600} \quad [\text{kWh}] \quad (4.25)$$

Çevrim süresince alınan yol [m] $S_{\text{çevrim}}$ olmak üzere 100 km'deki enerji sarfiyatı ($E_{\text{çevrim}}$):

$$E_{\text{çevrim}} = \frac{Q_{\text{çevrim}} \cdot 10^5}{S_{\text{çevrim}}} \quad [\text{kWh}/100\text{km}] \quad (4.26)$$

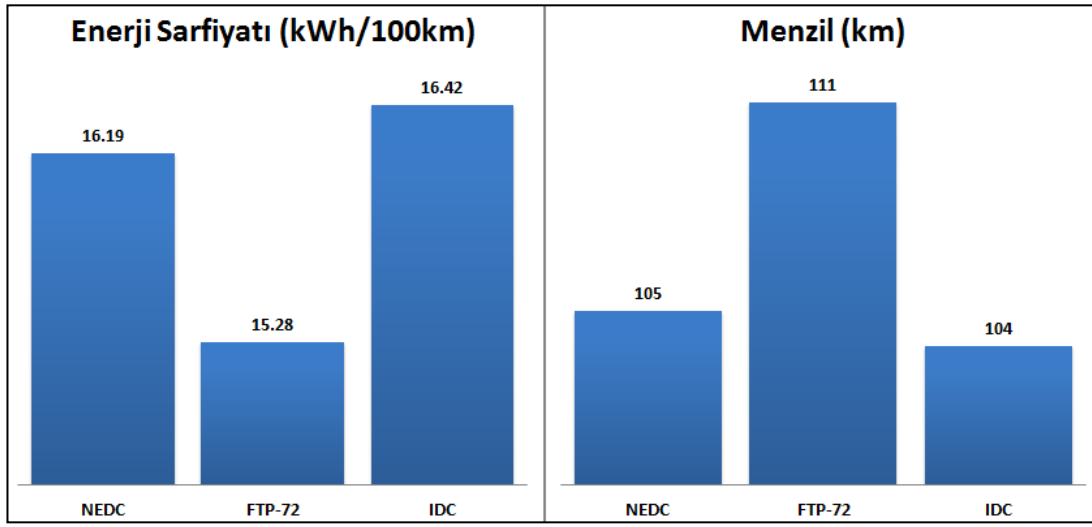
Tasarlanan taşıtta seçilen batarya kapasitesi ile analizi yapılan test çevrimlerini kaç defa gerçekleştirebileceği menzilin hesaplanması adına önem arz etmektedir. Tasarım aşamasında belirlenen SOC üst limiti (SOC_{max}) ve SOC alt limiti (SOC_{min}) arasında, bir çevrimdeki SOC değişiminden yola çıkılarak taşıtın gerçekleştirebileceği çevrim sayısı hesaplanmalıdır. Buna göre bir çevrim sonunda SOC'nin son durumu SOC_n olmak üzere çevrim sayısı ($n_{\text{çevrim}}$):

$$n_{\text{çevrim}} = \frac{SOC_{\text{max}} - SOC_{\text{min}}}{SOC_{\text{int}} - SOC_n} \quad (4.27)$$

Bir çevrimin uzunluğu $S_{\text{çevrim}}$ [m] olmak üzere taşıtın menzili (S_{menzil}):

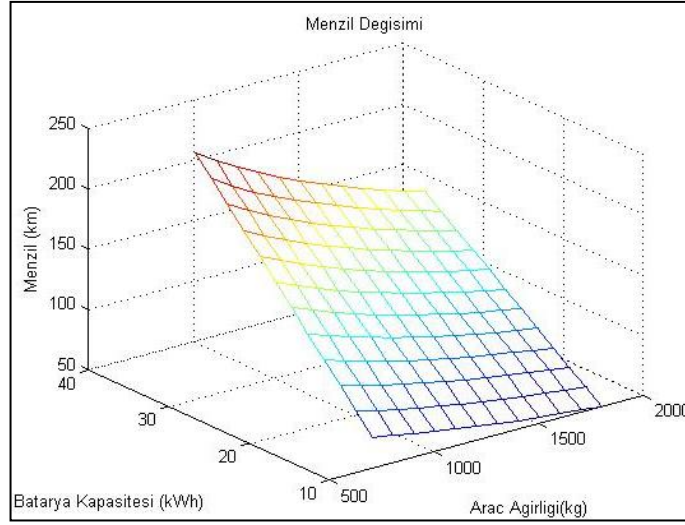
$$S_{\text{menzil}} = n_{\text{çevrim}} \cdot \frac{S_{\text{çevrim}}}{1000} \quad [\text{km}] \quad (4.28)$$

Enerji sarfiyatı ve menzil değerlerinin test çevrimlerine göre kıyaslanması durumunda aşağıdaki gibi bir sonuç ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.18)



Şekil 4.18 Test çevrimlerine göre enerji sarfiyatı ve menzil değerleri

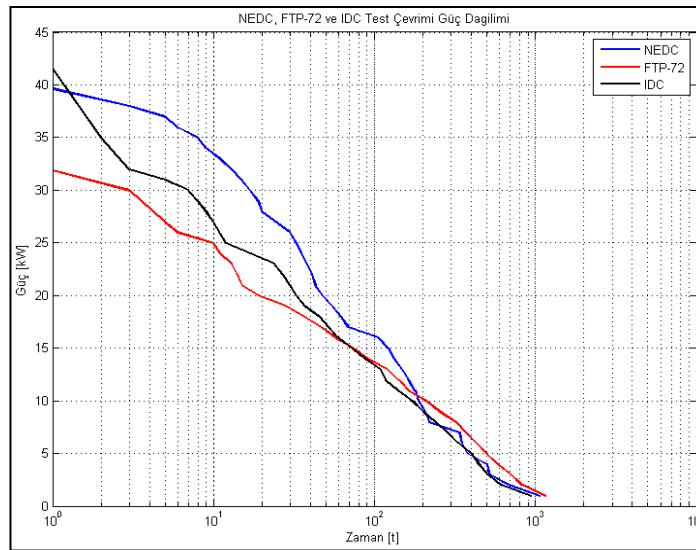
Yapılan analizden yola çıkarak taşıtın menzilin doğrudan etkileyen en önemli iki parametrenin taşıt ağırlığı ve batarya kapasitesi olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile menzil değerlerinde önemli artış veya azalışlar olmaktadır. Batarya kapasitesinin artması menzil değerinde önemli artışa sebep olmasına karşın araç ağırlığının artmasıyla menzil düşmektedir. NEDC test çevrimi için yapılan analizden yola çıkarak batarya kapasitesi ve araç ağırlığının farklı değerlerinde menzilin alacağı değerler aşağıdaki grafikte açıkça görülmektedir.



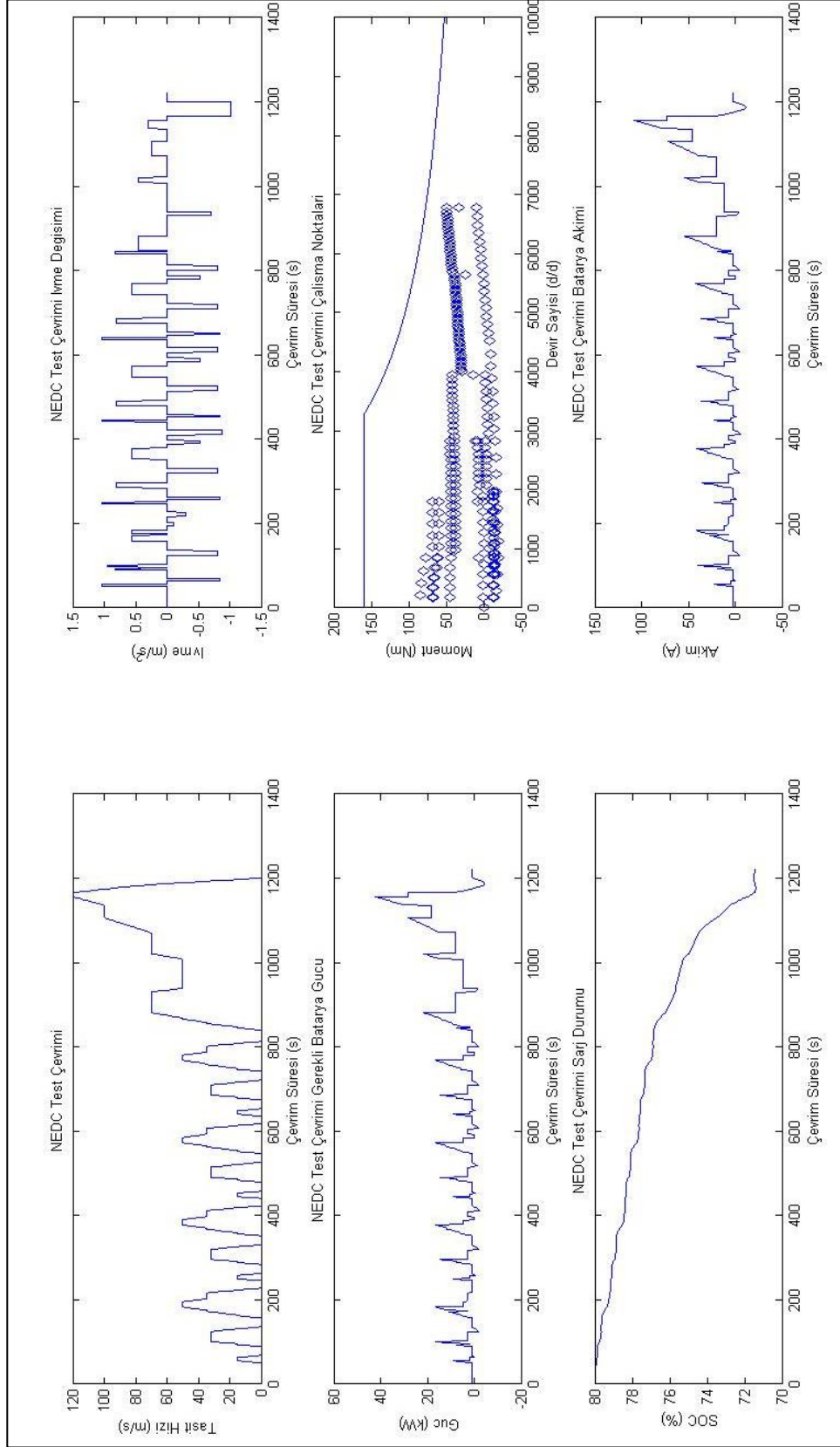
Şekil 4.19 Araç menzilinın batarya kapasitesi ve araç ağırlığına göre değışimi

İncelenen üç çevrim (NEDC, FTP-72, IDC) için yapılan hesaplamalar matlab programı ile yazılmıştır. Taşıt hızının ve ivmesinin çevrimlerin süresine göre değışimi verilerek analizi yapılan aracın bu şekilde yol alması sonucunda kullanılan elektrik motoru üzerindeki çalışma noktaları ve bataryada ihtiyaç duyulan anlık güç, akım ile bataryanın doluluk oranının (SOC) değışimi her bir çevrim için toplu olarak gösterilmiştir. Hibrit ve elektrik tahrikli araçlarda önemli bir tanım büyüklüğü olarak gücün zamanla değışiminin ortalama değeri ve tepe noktası önem arz etmektedir. Test çevrimlerine göre gücün dağılımı aşağıdaki gibi seyretmektedir.

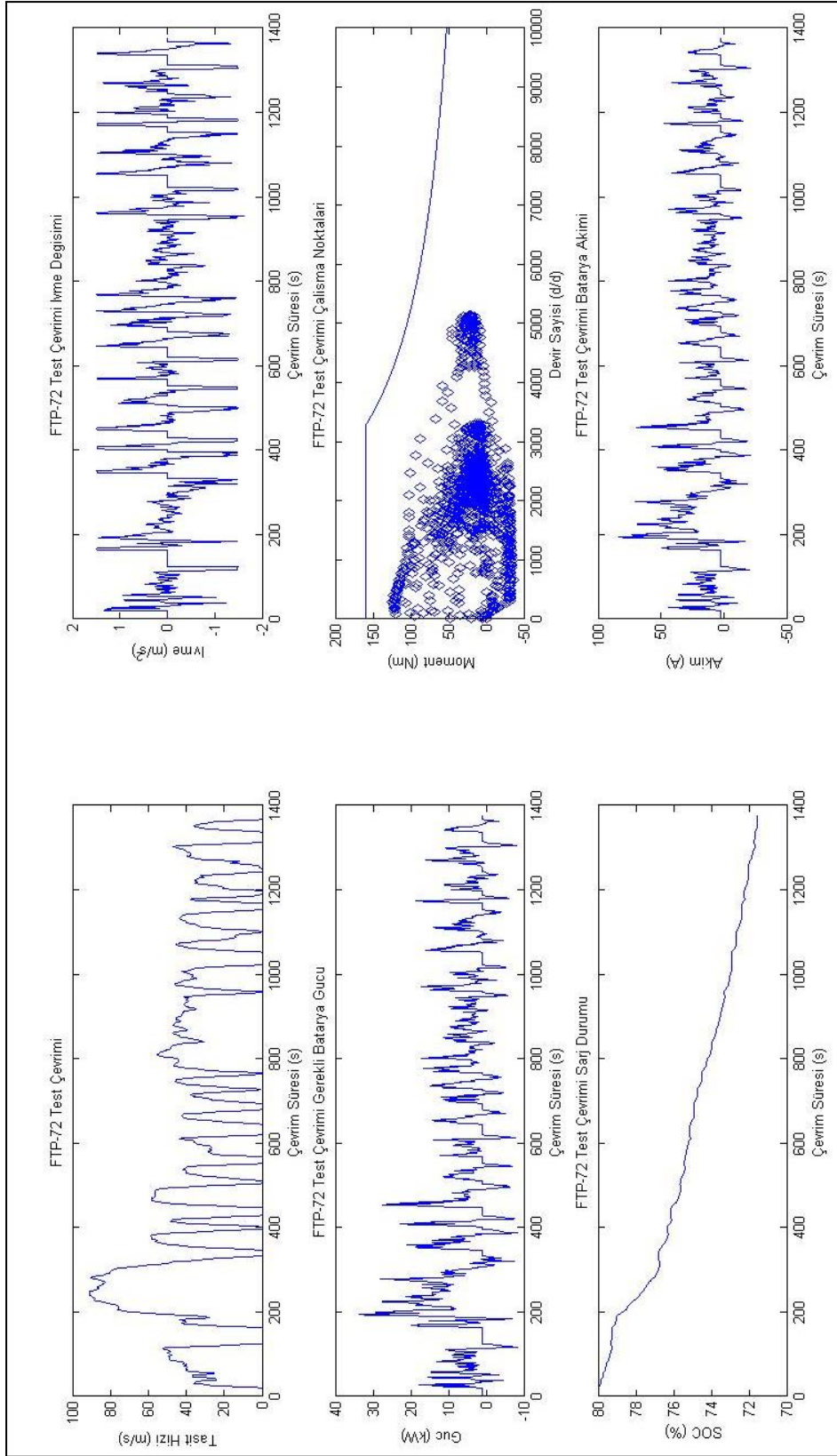
$$\bar{P}(t) = \max \left(\frac{1}{t} \cdot \int_{t_c}^{t_c+t} P(t) \cdot dt \right) \quad (4.29)$$



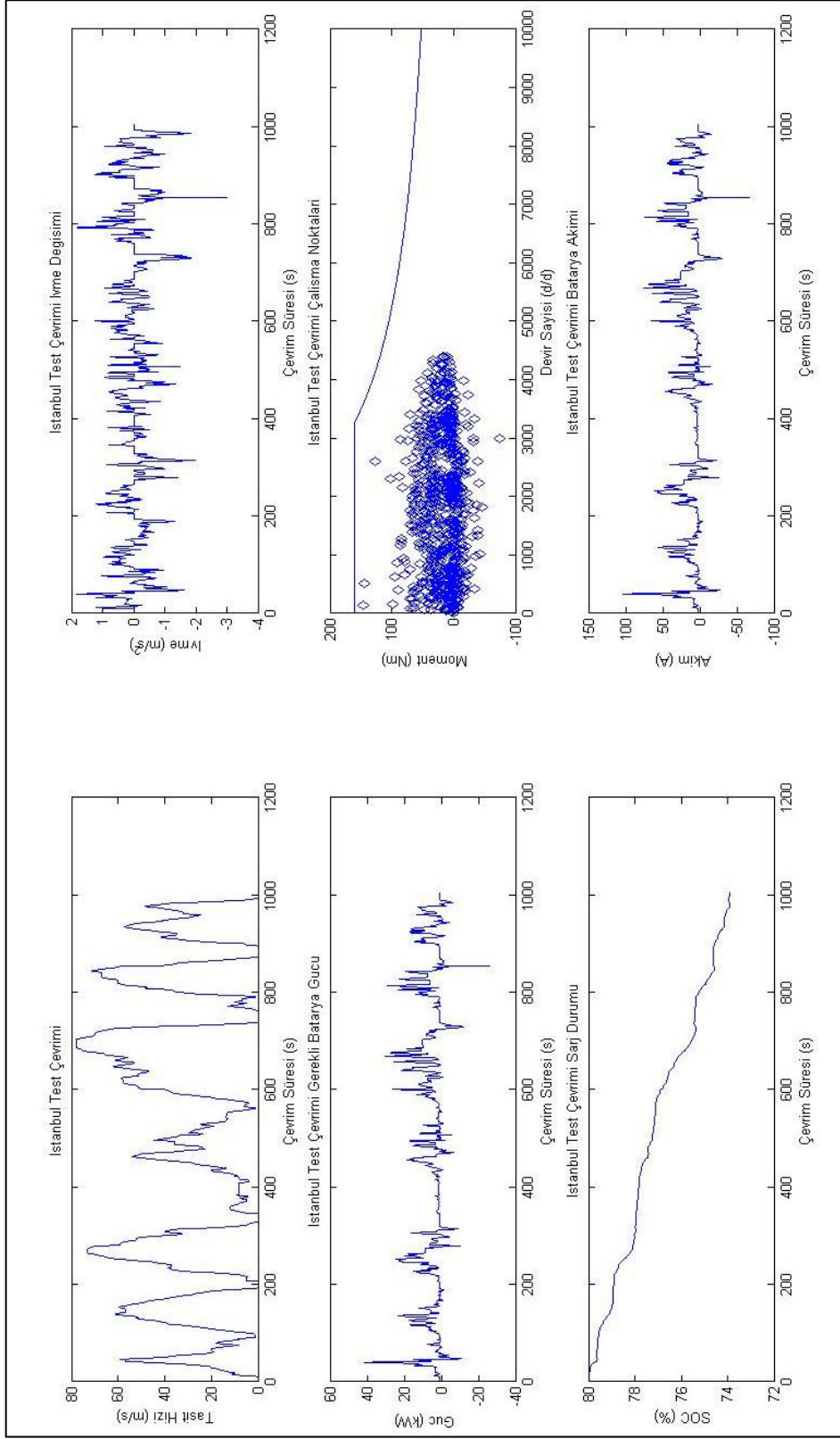
Şekil 4.20 Test çevrimlerine göre tahrik eden gücün zaman süresi diyagramı



Şekil 4.21 NEDC Test çevrimi için matlab sonuç ekranı



Şekil 4.22 FTP-72 Test çevrimi için matlab sonuç ekranı



Şekil 4.23 IDC Test çevrimi için matlab sonuç ekranı

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu proje kapsamında yerli üretim bir elektrikli aracın tasarım parametreleri belirlenmiş ve elde edilen kriterlere göre gerekli yapı elemanlarının boyutları belirlenmiştir. Bu kapsamda öncelikle gerekli olan elektrik motoru ve batarya özellikleri belirlenerek uygun şekilde seçim yapılmıştır. Belirlenen boyutsal özelliklerden yola çıkarak sistem şeması çizilmiş ve tahrik hattı oluşturulmuştur.

Batarya kapasitesinin tayini için bir optimizasyon yapılmış ve belirli kullanım süresi için benzinli bir araçla fiyatı mukayese edilmiştir. Enerji sarfiyatı ve ilk yatırım masrafı olarak bakıldığında, elektrikli araçların belirli bir kapasite ve menzilden üst değerlerde ekonomik açıdan dezavantajlı olduğu görülmüştür. Bu saptama ve elektrikli araçların uzun mesafe yol almak için yüksek batarya şarj süresi gerekmesi gibi özelliklerden dolayı şehir içi kullanımın elektrikli araçlar için uygun olacağı şu anki teknoloji için açıktır.

Batarya kapasitesinin belirlenmesinin ardından kullanılacak batarya tipi belirlenmiş ve batarya hücrelerine ait değerler tübitaktan alınmıştır. Yerli üretim olarak tasarlanan bu aracın bataryasının tasarımı, üretimi ve teknolojisi tübitak tarafından gerçekleştirilecektir. Bölüm 3' de prototip olarak üretilen batarya modülü gösterilmiştir.

Batarya ve elektrik motoru ile birlikte kullanılacak dişli sisteminin oranı belirlenmiş ve bu çevrim oranına göre tasarım yapılmıştır. Bu dişli sistemi, elektrik motorunun devir sayısı-tahrik momenti karakteristiğinin, motorlu taşıtlar için ideal düzeyde olması nedeniyle tek kademeli olarak yapılmıştır. Piyasadaki elektrikli araçlara baktığımızda 5-8 arasında değişen çevrim oranlarına rastlamak mümkündür. Bu tez kapsamında, taşıtın çıkabileceği maksimum yokuş eğimi ve maksimum hız değerlerine göre bu değer 6 olarak kararlaştırılmıştır.

Belirlenen değerler ışığında sistem matematiksel olarak modellenmiştir. Sistemin analizi için Amerika ve Avrupa'da geçerli standart çevrimler FTP-72 ve NEDC test çevrimleri kullanılmıştır. Ayrıca üretilen aracın yerli üretim olması ve ilk etapta yerli piyasaya hitap edecek olmasından dolayı İstanbul test çevrimi için de analiz

yapılmıştır. Bu test çevrimlerinin çevrim süresi-taşıt hızı verilerinden yola çıkılarak geri akışlı araç modeli oluşturularak batarya, elektrik motoru gibi yapı elemanlarının değişen parametreleri çevrim süresince hesaplanmıştır. Sonuçlar için en fazla önemi arz eden ve geliştirilecek kontrol algoritmalarına da ışık tutacak olan SOC durumundaki değişimler incelenmiştir. Batarya doluluk oranının tahmin edilmesine yönelik bu yaklaşım yalnız elektrikli araçlar için değil aynı zamanda hibrit araçlar ve yakıt hücreli araçlar için de büyük önem taşımaktadır.

Elde edilen sonuçların doğruluğunun karşılaştırılması adına, sistem parametreleri, Matlab/Simulink tabanlı çalışan bir program olan ve uluslar arası literatürde geçerlilik kazanmış ADVISOR programına girilerek sonuçlar teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Teorik elde edilen sonuçların karşılaştırılan program ile çok yakın çıkması kurulan modelin doğruluğunu göstermektedir. Oluşturulan teorik hesaplama yöntemine ait yazılan Matlab kodu EK-1’de verilmiştir.

Bu çalışma ile yerli üretim elektrikli bir araç tasarlamak için izlenecek yol belirtilmiştir. Henüz daha yeni sayılabilecek ve yaygınlaşmamış fakat yakın gelecekte yaygınlaşması kuvvetle muhtemel elektrikli araçlar konusunda tasarım ve analiz örneği verilerek bu çalışmanın gelecek akademik çalışmalara ve ileride üretilecek seri üretim yerli elektrikli araç çalışmalarında ışık tutması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akyazı, Ö., Küçükali, M. ve Akpınar A. S. (2011). Sürekli mıknatıslı senkron motorun hız denetiminin farklı bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmesi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*. 311-315.
- Amaç, A., Şahin, Y. ve Aras, F. (2008). ADVISOR ile otomotiv elektrik sistemlerinin benzetimi ve analizi. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı*.
- Boyalı, A. (2008). *Hibrit elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü*. Doktora Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dinç, C., Soruşbay, C., Ergeneman, M. ve Göktaş, A.G. (2012). Development of a driving cycle for the estimation of vehicle emissions. *6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*.
- Dorrell, D., Popescu M., Staton D.A., Knight A.M. ve Evans L. (2010). Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. *Energy Conversion Congress and Exposition*.
- Ehsani, M., Gao, Y. ve Emadi, A. (2010). *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles fundamentals, theory, and design (2)*. USA: CRC Press
- Ergeneman, M. (2013). Enerji ekonomisi ve çevre için seyir çevrimlerinin önemi. *Otam Aylık Bülten*, 45, 2-5.
- Erhan, K., Ayaz, M. ve Özdemir, E. (2013). Elektrikli araç şarj istasyonlarının güç kalitesi üzerine etkileri. *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*.

- He, H., Xiong, R. ve Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 4, 582-598.
- Jiang, B. (2013). *From electrode materials to dynamic models of li-ion cells*. Lisans Tezi: The Ohio State University, USA.
- Johnson, V.H. (2002). Battery performance models in ADVISOR. *Journal of Power Sources*, 110, (321-329).
- Keskin, A. (2009). Hibrit taşıt teknolojileri ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 50, 12-20.
- Kuralay, N.S. (2008). *Motorlu taşıtlar temel ve tasarım esasları, yapı elemanları, Cilt:1, (1)*. İzmir: Makina Mühendisleri Odası.
- Kuralay, N.S. (2013). *Motorlu taşıtlarda hibrit tahrik temeli ve tasarım esasları, yapı elemanları, çözümlü tasarım problemleri (1)*. İzmir: Makina Mühendisleri Odası.
- Maddala, R. (2003). *Modeling of hybrid electric vehicle batteries*. Yüksek Lisans Tezi: Texas Tech University, Texas.
- Mi, C., Masrur, M.A. ve Gao, D.W. (2011). *Hybrid electric vehicles principles and applications with practical perspectives (1)*. UK: Wiley.
- Odvarka, E., Mebarki, A., Gerada, D., Brown, N. ve Ondrusek, C. (2009). Electric motor-generator for a hybrid electric vehicle. *Engineering Mechanics*, 16, 131-139.
- Polat, B.D. ve Keleş, Ö. (2012). Lityum iyon pil teknolojisi. *Metalurji Mühendisleri Odası*, 42-48.

- Sauer, U.D. (2009). Elektrische energiespeicher in hybrid und elektrofahrzeugen. *Seminar für Kraftfahrzeug un Motorentchnik*, Berlin.
- Sayın, A.A. ve Yüksel, İ. (2011). Elektrikli renault fluence aracı, lityum-iyon bataryanın modellenmesi ve batarya yönetimi. *Mühendis ve Makina*, 52, 75-82.
- Schaltz, E. (2011). Electrical vehicle design and modeling. *Electrical vehicles-modeling and simulations* (1. Baskı) içinde (1-23). Croatia: InTech
- Uçarol, H. ve Kural, E. (2009). Ulaşımında enerji verimliliği için hibrit ve elektrikli araçlar. *Mühendis ve Makina*, 50, 66-71.
- Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A. ve diğer. (2003). *Elektrikli Araçlar Raporu*. Enerji Sistemleri ve Araştırma Enstitüsü, Gebze.
- Vairamohan, B. (2002). State of charge estimation for batteries. Yüksek Lisans Tezi: The University of Tennessee, Knoxville.
- Velle, R.G. ve Lopez, J.P. (Ed.). (2013). *Electric vehicle integration into modern power Networks*. USA: Springer Press.
- Yıldız, M. ve Topçu, T.N. (2012). *Hibrit ve tümü elektrikli araçlarda kontrol ve enerji yönetimi sistemleri Teknik Raporu*. Ankara.

EKLER

EK- 1 (Hesaplamalara ait Matlab kodları)

```
clc;clear;close all
fR=0.009;% yuvarlanma direnç katsayisi
g=9.81;% yerçekimi ivmesi [m/s^2]
m=1000;% araç kütlesi [kg]
roL=1.2;% havanın özgül ağırlığı [kg/m^3]
A=2;% aracın projeksiyon alanı [m^2]
Cw=0.33;% aerodinamik direnç katsayisi
r=0.282;% tekerlek yarıçapı [m]
vmot1=0.9;% elektrik motoru verimi
vmek=0.85;% mekanik verim
itop=6;% toplam çevrim oranı
lam=1.05;% dönen kütle faktörü
Mmax=160;% motor maksimum momenti [Nm]
Pmax=55;% motor maksimum gücü [kW]
nmax=10000;% motor maksimum devir sayısı [d/d]
ky=1.5;% elektrik motoru yükleme faktörü sayısı
for n1=0:1:nkr;
    nn1=n1+1;
M1 (nn1)=Mmax;
M3 (nn1)=Mmax*ky;
end
n2=nkr:1:nmax;
M2=Pmax.*9549./n2;
M4=ky*Pmax.*9549./n2;
M=[M1 M2];
MM=[M3 M4];
n=0:1:nmax;
v=(n*pi*r)/(30*itop);% tasit hizi [m/s]
vt=v*3.6;% tasit hizi [km/h]
Md=(m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*v.^2)*r/(vmot1*vmek*itop);% düz yol direnç momentleri
Mdy5=(m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*v.^2+m*g*sin(atan(0.05)))*r/(vmot1*vmek*itop); % %5 yokus egimi ile direnç momentleri
Mdy10=(m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*v.^2+m*g*sin(atan(0.10)))*r/(vmot1*vmek*itop); % %10 yokus egimi ile direnç momentleri
Mdy15=(m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*v.^2+m*g*sin(atan(0.15)))*r/(vmot1*vmek*itop); % %15 yokus egimi ile direnç momentleri
Mdy20=(m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*v.^2+m*g*sin(atan(0.20)))*r/(vmot1*vmek*itop); % %20 yokus egimi ile direnç momentleri
Mdy25=(m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*v.^2+m*g*sin(atan(0.25)))*r/(vmot1*vmek*itop); % %25 yokus egimi ile direnç momentleri

figure(1)

    subplot(2,2,1)
        plot(n,M,n,Md,n,Mdy5,n,Mdy10,n,Mdy15,n,Mdy20,n,Mdy25)% elektrik motoru moment egrisi
xlabel('Devir Sayisi (d/d)'); ylabel('Motor Momenti (Nm)');
title('Motor Momenti ve Direnç Momentleri')
legend('Motor Momenti','Direnç Momenti (Düz Yol)','Direnç Momenti (%5 Egim)','Direnç Momenti (%10 Egim)','Direnç Momenti (%15 Egim)','Direnç Momenti (%20 Egim)','Direnç Momenti (%25 Egim)')

    subplot(2,2,2)
```

```

    plot(vt,M,vt,MM)% yükleme faktörü ile ve normal elektrik motoru
moment egrisi
xlabel('Tasit Hizi (km/h)'); ylabel('Motor Momenti (Nm)');
title('Motor Momenti ve Direnç Momentleri')
legend('Motor Momenti','Asiri Yüklemeli Motor Momenti')

an=((M.*itop*vmot1*vmek/r)-(m*g*fR+0.5*roL*Cw*A*v.^2))/(m*lam);%
aracin maksimum ivmelenme egrisi
tn=(lam*m.*v)./(M.*itop*vmot1*vmek/r)-(m*g*fR+0.5*roL*Cw*A*v.^2));%
ivmelenme süresi
tpik=(lam*m*v)./(MM*itop*vmot1*vmek/r)-
(m*g*fR+0.5*roL*Cw*A*v.^2));% ivmelenme süresi (asiri yükleme ile)
vvt=vt(1:8001);ttn=tn(1:8001);ttpik=tpik(1:8001);

    subplot(2,2,3)
    plot(vt,an)
xlabel('Tasit Hizi (km/h)'); ylabel('Ivme (m/s^2)'); title('Araç
Ivmelenme Kapasitesi')

    subplot(2,2,4)
    plot(vvt,ttn,vvt,ttpik)
xlabel('Tasit Hizi (km/h)'); ylabel('Hizlanma Süresi (s)');
title('Araç Hizlanma Egrisi')
legend('Max Motor Momenti','Asiri Yüklemeli Motor Momenti')

%%%%%% Batarya Özellikleri %%%%%%

Qh=20;% batarya hücre kapasitesi [Ah]
Qbat=17;% toplam batarya kapasitesi [kWh]
Vh=3.2;% batarya hücre voltajı [V]
mh=0.455;% batarya hücre ağırlığı [kg]
Sh=11;% bir modüldeki hücre sayısı
Sm=24;% bataryadaki toplam modül sayısı
vbat=0.85;% batarya verimi
Pic=857;% iç ihtiyaç gücü [W]
mb=mh*Sh*Sm;% batarya ağırlığı
Vb=Vh*Sh*Sm;% batarya voltajı [V]
soc=0:1:100;% batarya doluluk oranı (State of Charge)
Ris=-0.3306.*(soc./100).^5+0.884.*(soc./100).^4-
0.8833.*(soc./100).^3+0.4181.*(soc./100).^2-
0.0955.*(soc./100)+0.0122;
Rids=10.1791.*(soc./100).^6-
31.8588.*(soc./100).^5+38.6412.*(soc./100).^4-
23.0181.*(soc./100).^3+7.0614.*(soc./100).^2-
1.071.*(soc./100)+0.071;
%--- figure(5), plot(soc,Ris,soc,Rids)
%--- xlabel('SOC (%)'); ylabel('İç Direnç'); title('Sarj ve Desarj
İç Direnç Değişimi')
%--- legend('Sarj','Desarj')
Rhv=-16.8109.*(soc./100).^5+37.3296.*(soc./100).^4-
24.315.*(soc./100).^3+1.8055.*(soc./100).^2+3.0674.*(soc./100)+2.119
9;
%--- figure(6), plot(soc,Rhv)
%--- xlabel('SOC (%)'); ylabel('Hücre Voltajı (V)'); title('Hücre
Voltajı Değişimi')

%%%%%% Elektrik Motoru Verimi %%%%%%

```

```

% (N*m), motor momenti araligi
x=[-176.4 -156.8 -137.2 -117.6 -98 -78.4 -58.8 -39.2 -19.6 0.0...
    19.6    39.2    78.4    98.0    117.6 137.2 156.8 176.4 235.2
274.4];

```

```

% (d/d), devir sayisi araligi
y=[0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 5500 ...
    6000 6500 7000 7500 8000 8500];

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% motor verimi
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

z = 0.01*[...
54.17    56.09    59.74    62.16    64.71    64.88    66.49    68.30
63.07    63.07    87.76    84.71    79.49    78.10    76.56    75.09
73.90    71.33    63.88    59.75
54.17    56.09    59.74    62.16    64.71    64.88    66.49    68.30
63.07    63.07    87.76    84.71    79.49    78.10    76.56    75.09
73.90    71.33    63.88    59.75
70.00    71.77    75.20    78.37    80.62    82.73    84.62    85.31
80.23    80.23    85.98    86.96    87.34    86.64    85.45    84.73
84.03    83.26    80.81    77.35
79.08    80.25    82.73    84.76    86.91    87.56    87.27    87.20
80.24    80.24    87.45    88.53    89.23    89.37    88.36    88.08
87.98    87.33    85.65    82.47
83.36    84.27    86.74    88.36    89.34    90.20    90.39    89.14
81.05    81.05    90.54    90.31    90.33    90.42    90.38    90.13
89.86    89.38    87.95    87.25
86.38    87.62    88.89    90.36    90.71    91.07    91.08    89.20
83.52    83.52    88.41    91.83    91.51    91.56    91.43    91.28
91.02    91.23    90.67    90.67
90.83    90.83    91.04    91.41    92.60    91.95    92.22    90.68
84.90    84.90    90.61    91.38    92.36    92.29    92.35    92.16
92.12    93.52    93.61    93.61
92.78    92.78    92.78    92.78    93.06    93.10    92.21    91.79
84.92    84.92    90.37    92.79    93.59    94.31    94.42    94.68
95.24    95.42    95.42    95.42
93.49    93.49    93.49    93.49    93.49    93.74    93.45    91.19
86.24    86.24    93.14    94.56    95.69    95.67    96.02    96.07
95.88    95.88    95.88    95.88
94.37    94.37    94.37    94.37    94.37    94.24    93.97    91.80
85.70    85.70    90.78    93.73    96.00    96.13    96.39    96.23
96.23    96.23    96.23    96.23
95.03    95.03    95.03    95.03    95.03    94.26    94.29    91.51
82.22    82.22    89.23    93.00    95.29    96.05    96.05    96.05
96.05    96.05    96.05    96.05
94.75    94.75    94.75    94.75    94.75    94.75    93.06    90.49
81.37    81.37    87.75    92.89    95.47    95.83    95.83    95.83
95.83    95.83    95.83    95.83
94.07    94.07    94.07    94.07    94.07    94.07    93.27    89.98
80.69    80.69    86.69    92.47    95.18    95.40    95.40    95.40
95.40    95.40    95.40    95.40
93.84    93.84    93.84    93.84    93.84    93.84    92.95    89.38
79.83    79.83    86.00    92.05    95.06    95.48    95.48    95.48
95.48    95.48    95.48    95.48

```

```

93.05  93.05  93.05  93.05  93.05  93.05  93.05  89.16
78.99  78.99  85.00  91.13  94.50  94.70  94.70  94.70
94.70  94.70  94.70  94.70
92.12  92.12  92.12  92.12  92.12  92.12  92.12  88.90
77.41  77.41  84.26  90.75  94.21  94.21  94.21  94.21
94.21  94.21  94.21  94.21
91.27  91.27  91.27  91.27  91.27  91.27  91.27  88.14
76.08  76.08  82.89  90.31  93.49  93.49  93.49  93.49
93.49  93.49  93.49  93.49
90.47  90.47  90.47  90.47  90.47  90.47  90.47  87.80
75.97  75.97  82.22  89.96  93.17  93.17  93.17  93.17
93.17  93.17  93.17  93.17
];
figure(2), meshgrid(x,y,z);
meshc(x,y,z);
xlabel('Motor Momenti (Nm)'),ylabel('Devir Sayisi (d/d)');
zlabel('Motor Verimi');
title('Sürekli Miknatisli Senkron Motor Verim Haritası');

data_nedc=xlsread('nedc_data.xlsx');
m_nedc=data_nedc(:,2);
n_nedc=data_nedc(:,3);
verim_nedc=interp2(x,y,z,m_nedc,n_nedc,'spline');% NEDC çevrimi
motor verimi
data_ftp72=xlsread('ftp72_data.xlsx');
m_ftp72=data_ftp72(:,2);
n_ftp72=data_ftp72(:,3);
verim_ftp72=interp2(x,y,z,m_ftp72,n_ftp72,'spline');% FTP-72
çevrimi motor verimi
v_nedc=data_nedc(:,1);% NEDC çevrimi tasit hizi (km/h)
v_ftp72=data_ftp72(:,1);% FTP-72 çevrimi tasit hizi (km/h)
vs_nedc=v_nedc/3.6;% NEDC çevrimi tasit hizi (m/s)
vs_ftp72=v_ftp72/3.6;% FTP-72 çevrimi tasit hizi (m/s)
n_arc_nedc=(vs_nedc*60*itop)/(2*pi*r);% NEDC çevrimi gerekli devir
sayisi
n_arc_ftp72=(vs_ftp72*60*itop)/(2*pi*r);% FTP-72 çevrimi gerekli
devir sayisi

data_ist=xlsread('ist_data.xlsx');%Istanbul Sehir Çevrimi
m_ist=data_ist(:,2);
n_ist=data_ist(:,3);
verim_ist=interp2(x,y,z,m_ist,n_ist,'spline');% Istanbul çevrimi
motor verimi
v_ist=data_ist(:,1);% Istanbul çevrimi tasit hizi (km/h)
vs_ist=v_ist/3.6;% Istanbul çevrimi tasit hizi (m/s)
n_arc_ist=(vs_ist*60*itop)/(2*pi*r);% Istanbul çevrimi gerekli devir
sayisi

% Araç Data

L=2.511;% Araç Aks Araligi
Lo=1.2555;% Ön aksin araç ağırlık merkezine uzakligi
La=1.2555;% Arka aksin araç ağırlık merkezine uzakligi
h=0.57;% Ağırlık merkezi yüksekligi
X=h/L;
Fi=Lo/L;
kxfi=(1-Fi)/(2*X);

```

```

% Çevrimlere Göre Verimler%
%NEDC
figure(3)
a=v_nedc';
b=verim_nedc;
t=1:length(v_nedc);
    subplot(3,1,1)
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(t,b,t,a);
xlabel('Çevrim Süresi
(s)'),ylabel(haxes(1),'Verim'),ylabel(haxes(2),'Tasit Hizi (km/h)');
title('NEDC Test Çevrimi Elektrik Motor Verimi');
%FTP-72
a=v_ftp72';
b=verim_ftp72;
t=1:length(v_ftp72);
    subplot(3,1,2)
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(t,b,t,a);
xlabel('Çevrim Süresi
(s)'),ylabel(haxes(1),'Verim'),ylabel(haxes(2),'Tasit Hizi (km/h)');
title('FTP-72 Test Çevrimi Elektrik Motor Verimi');
%IDC
a=v_ist';
b=verim_ist;
t=1:length(v_ist);
    subplot(3,1,3)
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(t,b,t,a);
xlabel('Çevrim Süresi
(s)'),ylabel(haxes(1),'Verim'),ylabel(haxes(2),'Tasit Hizi (km/h)');
title('IDC Test Çevrimi Elektrik Motor Verimi');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% NEDC Test Çevrimi Analizi %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(4)
    subplot(3,2,1)
        plot(v_nedc)
        xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Tasit Hizi (m/s)');
title('NEDC Test Çevrimi');

aa_nedc=data_nedc(:,5);% NEDC çevrimi hızlanma ivmesi
ae_nedc=data_nedc(:,4);% NEDC çevrimi yavaşlama ivmesi

    subplot(3,2,2)
        plot(ae_nedc+aa_nedc)% NEDC ivme degisimi
        xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Ivme (m/s^2)'); title('NEDC
Test Çevrimi Ivme Degisimi');

Fb_nedc=-1*m*lam*ae_nedc;% NEDC çevrimi toplam fren kuvveti
Fbo_nedc=X*m*g*((Fb_nedc.^2./(m*g)^2)+(2*(Fb_nedc./(m*g))*kxfi));%
ön aksa düşen fren kuvveti
for nn=1:length(vs_nedc);
if Fb_nedc(nn)>0;
    iF_nedc(nn)=Fbo_nedc(nn)/Fb_nedc(nn);
else
    iF_nedc(nn)=0;
end
end

```



```

iF_nedc=iF_nedc';
Pm_nedc=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_nedc.^2+lam*m*aa_nedc+lam*m*vmek.^2
*ae_nedc.*verim_nedc.^2.*iF_nedc).*vs_nedc)./(1000*vmek*verim_nedc);
% NEDC çevrimi gerekli motor gücü
Pb_nedc=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_nedc.^2+lam*m*aa_nedc+lam*m*vmek.^2
*ae_nedc.*verim_nedc.^2.*iF_nedc).*vs_nedc)./(1000*vmek*verim_nedc*
vbat))+ (Pic/(1000*vbat));% NEDC çevrimi gerekli batarya gucu
(rekuperasyon dahil)

subplot(3,2,3)
plot(Pb_nedc)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Guc (kW)'); title('NEDC Test
Çevrimi Gerekli Batarya Gucu');

for nn=1:length(vs_nedc);
if n_arc_nedc(nn)>0;% NEDC Çalışma Noktaları
M_nedc(nn)=(Pm_nedc(nn)*9549)./n_arc_nedc(nn);
else
M_nedc(nn)=0;
end
end

subplot(3,2,4)
plot(n,M)
hold on
plot(n_arc_nedc,M_nedc,'d')
xlabel('Devir Sayisi (d/d)'),ylabel('Moment (Nm)'); title('NEDC
Test Çevrimi Çalışma Noktaları');

Pb2_nedc=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_nedc.^2+lam*m*aa_nedc).*vs_nedc).
/(1000*vmek*verim_nedc*vbat))+ (Pic/(1000*vbat));% NEDC çevrimi
gerekli batarya gucu (rekuperasyon hariç)

%%% NEDC SOC Durumu %%%

SOCN(1)=(Qbat-(Pb_nedc(1)/3600))/Qbat)*0.8*100;% rekuperasyon dahil
for x=2:length(vs_nedc);
SOCN(x)=((Qbat*SOCN(x-1)/80)-(Pb_nedc(x-1)/3600))/(Qbat*SOCN(x-
1)/80))*SOCN(x-1);
end
subplot(3,2,5)
plot(SOCN)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('SOC (%)'); title('NEDC Test
Çevrimi Sarj Durumu');

SOCN2(1)=(Qbat-(Pb2_nedc(1)/3600))/Qbat)*0.8*100;% rekuperasyon
hariç
for x=2:length(vs_nedc);
SOCN2(x)=((Qbat*SOCN2(x-1)/80)-(Pb2_nedc(x-1)/3600))/(Qbat*SOCN2(x-
1)/80))*SOCN2(x-1);
end

Vb_nedc=(-16.8109*(SOCN/100).^5+37.3296*(SOCN/100).^4-
24.315*(SOCN/100).^3+1.8055*(SOCN/100).^2+3.0674*(SOCN/100)+2.1199)*
Sh*(Sm/2);% NEDC çevrimi batarya voltajı degisimi
Vb_nedc=Vb_nedc';

```

```

for nn=1:length(vs_nedc);% NEDC Çevrimi İç direnç degisimi
    for mm=1:length(SOCN);
    if Pb_nedc(nn)>0;
        Ri_nedc(nn)=10.1791.*(SOCN(mm)./100).^6-
31.8588.*(SOCN(mm)./100).^5+38.6412.*(SOCN(mm)./100).^4-
23.0181.*(SOCN(mm)./100).^3+7.0614.*(SOCN(mm)./100).^2-
1.071.*(SOCN(mm)./100)+0.071;
    else
        Ri_nedc(nn)=-
0.3306.*(SOCN(mm)./100).^5+0.884.*(SOCN(mm)./100).^4-
0.8833.*(SOCN(mm)./100).^3+0.4181.*(SOCN(mm)./100).^2-
0.0955.*(SOCN(mm)./100)+0.0122;
    end
    end
end
Ri_nedc=Ri_nedc';

i_nedc=(Vb_nedc-sqrt(Vb_nedc.^2-
4.*Ri_nedc.*Pb_nedc.*1000))./(2*Ri_nedc);% NEDC çevrimi batarya
akimi degisimi

    subplot(3,2,6)
    plot(i_nedc)
    xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Akim (A)'); title('NEDC Test
Çevrimi Batarya Akimi');

% NEDC Karsilastirma %
SOC_adv_nedc=data_nedc(:,6);% Advisor SOC sonuçlari
figure(5)
    subplot(1,2,1)
    plot(SOCN)
    hold on
    plot(SOC_adv_nedc,'r')
    xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('SOC (%)'); title('NEDC Test
Çevrimi Sarj Durumu');
    legend('Bu çalışma','Advisor')

i_adv_nedc=data_nedc(:,7);% Advisor Akim sonuçlari

    subplot(1,2,2)
    plot(i_nedc)
    hold on
    plot(i_adv_nedc,'r')
    xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Akim (A)'); title('NEDC Test
Çevrimi Batarya Akimi Degisimi');
    legend('Bu çalışma','Advisor')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FTP-72 Test Çevrimi Analizi %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(6)

    subplot(3,2,1)
    plot(v_ftp72)
    xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Tasit Hizi (m/s)');
title('FTP-72 Test Çevrimi');

```

```

aa_ftp72=data_ftp72(:,5);% FTP-72 çevrimi hizlanma ivmesi
ae_ftp72=data_ftp72(:,4);% FTP-72 çevrimi yavaslaama ivmesi

subplot(3,2,2)
plot(ae_ftp72+aa_ftp72)% FTP-72 çevrimi ivme degisimi
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Ivme (m/s^2)'); title('FTP-72
Test Çevrimi Ivme Degisimi');

Fb_ftp72=-1*m*lam*ae_ftp72;% FTP-72 çevrimi toplam fren kuvveti
Fbo_ftp72=X*m*g*((Fb_ftp72.^2./(m*g)^2)+(2*(Fb_ftp72./(m*g))*kxfi));
% ön aksa düşen fren kuvveti
for nn=1:length(vs_ftp72);
if Fb_ftp72(nn)>0;
iF_ftp72(nn)=Fbo_ftp72(nn)/Fb_ftp72(nn);
else
iF_ftp72(nn)=0;
end
end
iF_ftp72=iF_ftp72';
Pm_ftp72=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_ftp72.^2+lam*m*aa_ftp72+lam*m*vme
k.^2*ae_ftp72.*verim_ftp72.^2.*iF_ftp72).*vs_ftp72)./(1000*vme
k*verim_ftp72);% FTP-72 çevrimi gerekli motor gücü
Pb_ftp72=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_ftp72.^2+lam*m*aa_ftp72+lam*m*vme
k.^2*ae_ftp72.*verim_ftp72.^2.*iF_ftp72).*vs_ftp72)./(1000*vme
k*verim_ftp72*vbat))+ (Pic/(1000*vbat));% FTP-72 çevrimi gerekli batarya
gucu (rekuperasyon dahil)

subplot(3,2,3)
plot(Pb_ftp72)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Guc (kW)'); title('FTP-72 Test
Çevrimi Gerekli Batarya Gucu');

for nn=1:length(vs_ftp72);
if n_arc_ftp72(nn)>0;% FTP-72 Çalışma Noktaları
M_ftp72(nn)=(Pm_ftp72(nn)*9549)./n_arc_ftp72(nn);
else
M_ftp72(nn)=0;
end
end

subplot(3,2,4)
plot(n,M)
hold on
plot(n_arc_ftp72,M_ftp72,'d')
xlabel('Devir Sayisi (d/d)'),ylabel('Moment (Nm)'); title('FTP-72
Test Çevrimi Çalışma Noktaları');

Pb2_ftp72=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_ftp72.^2+lam*m*aa_ftp72).*vs_ftp
72)./(1000*vme
k*verim_ftp72*vbat))+ (Pic/(1000*vbat));% FTP-72
çevrimi gerekli batarya gucu (rekuperasyon hariç)

%%% FTP-72 SOC Durumu %%%

SOCF(1)=((Qbat-(Pb_ftp72(1)/3600))/Qbat)*0.8*100;% rekuperasyon
dahil
for x=2:length(vs_ftp72);

```

```

SOCF(x)=(((Qbat*SOCF(x-1)/80)-(Pb_ftp72(x-1)/3600))/(Qbat*SOCF(x-1)/80))*SOCF(x-1);
end
subplot(3,2,5)
plot(SOCF)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('SOC (%)'); title('FTP-72 Test Çevrimi Sarj Durumu');

SOCF2(1)=((Qbat-(Pb2_ftp72(1)/3600))/Qbat)*0.8*100;% rekuperasyon hariç
for x=2:length(vs_ftp72);
SOCF2(x)=(((Qbat*SOCF2(x-1)/80)-(Pb2_ftp72(x-1)/3600))/(Qbat*SOCF2(x-1)/80))*SOCF2(x-1);
end

Vb_ftp72=(-16.8109*(SOCF/100).^5+37.3296*(SOCF/100).^4-24.315*(SOCF/100).^3+1.8055*(SOCF/100).^2+3.0674*(SOCF/100)+2.1199)*Sh*(Sm/2);% FTP-72 çevrimi batarya voltajı değisimi
Vb_ftp72=Vb_ftp72';

for nn=1:length(vs_ftp72);% FTP-72 Çevrimi İç direnç değisimi
for mm=1:length(SOCF);
if Pb_ftp72(nn)>0;
Ri_ftp72(nn)=10.1791.*(SOCF(mm)./100).^6-31.8588.*(SOCF(mm)./100).^5+38.6412.*(SOCF(mm)./100).^4-23.0181.*(SOCF(mm)./100).^3+7.0614.*(SOCF(mm)./100).^2-1.071.*(SOCF(mm)./100)+0.071;
else
Ri_ftp72(nn)=-0.3306.*(SOCF(mm)./100).^5+0.884.*(SOCF(mm)./100).^4-0.8833.*(SOCF(mm)./100).^3+0.4181.*(SOCF(mm)./100).^2-0.0955.*(SOCF(mm)./100)+0.0122;
end
end
end
Ri_ftp72=Ri_ftp72';

i_ftp72=(Vb_ftp72-sqrt(Vb_ftp72.^2-4.*Ri_ftp72.*Pb_ftp72.*1000))./(2*Ri_ftp72);% FTP-72 çevrimi batarya akımı değisimi

subplot(3,2,6)
plot(i_ftp72)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Akım (A)'); title('FTP-72 Test Çevrimi Batarya Akımı');

% FTP-72 Karsilastirma %
SOC_adv_ftp72=data_ftp72(:,6);% Advisor SOC sonuçlari
figure(7)

subplot(1,2,1)
plot(SOCF)
hold on
plot(SOC_adv_ftp72,'r')
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('SOC (%)'); title('FTP-72 Test Çevrimi Sarj Durumu');
legend('Bu çalışma','Advisor')

```

```

i_adv_ftp72=data_ftp72(:,7);% Advisor Akim sonuçlari

subplot(1,2,2)
plot(i_ftp72)
hold on
plot(i_adv_ftp72,'r')
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Akim (A)'); title('NEDC Test
Çevrimi Batarya Akimi Degisimi');
legend('Bu çalisma','Advisor')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Istanbul Test Çevrimi Analizi %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(8)
subplot(3,2,1)
plot(v_ist)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Tasit Hizi (m/s)');
title('Istanbul Test Çevrimi');

aa_ist=data_ist(:,5);% Istanbul çevrimi hizlanma ivmesi
ae_ist=data_ist(:,4);% Istanbul çevrimi yavaslama ivmesi

subplot(3,2,2)
plot(ae_ist+aa_ist)% Istanbul ivme degisimi
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Ivme (m/s^2)');
title('Istanbul Test Çevrimi Ivme Degisimi');

Fb_ist=-1*m*lam*ae_ist;% Istanbul çevrimi toplam fren kuvveti
Fbo_ist=X*m*g*((Fb_ist.^2./(m*g)^2)+(2*(Fb_ist./(m*g))*kxfi));% ön
aksa düşen fren kuvveti
for nn=1:length(vs_ist);
if Fb_ist(nn)>0;
iF_ist(nn)=Fbo_ist(nn)/Fb_ist(nn);
else
iF_ist(nn)=0;
end
end
iF_ist=iF_ist';
Pm_ist=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_ist.^2+lam*m*aa_ist+lam*m*vmek.^2*ae_ist.*verim_ist.^2.*iF_ist).*vs_ist)./(1000*vmek*verim_ist);%
Istanbul çevrimi gerekli motor gücü
Pb_ist=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_ist.^2+lam*m*aa_ist+lam*m*vmek.^2*ae_ist.*verim_ist.^2.*iF_ist).*vs_ist)./(1000*vmek*verim_ist*vbat))+
Pic/(1000*vbat);% Istanbul çevrimi gerekli batarya gucu
(rekuperasyon dahil)

subplot(3,2,3)
plot(Pb_ist)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Guc (kW)'); title('Istanbul
Test Çevrimi Gerekli Batarya Gucu');

for nn=1:length(vs_ist);
if n_arc_ist(nn)>0;% Istanbul Çalisma Noktalari
M_ist(nn)=(Pm_ist(nn)*9549)./n_arc_ist(nn);
else

```

```

M_ist(nn)=0;
end
end

subplot(3,2,4)
plot(n,M)
hold on
plot(n_arc_ist,M_ist,'d')
xlabel('Devir Sayisi (d/d)'),ylabel('Moment (Nm)');
title('Istanbul Test Çevrimi Çalışma Noktalari');

Pb2_ist=((m*g*fR+0.5*roL*A*Cw*vs_ist.^2+lam*m*aa_ist).*vs_ist)./(10
00*vmek*verim_ist*vbat))+ (Pic/(1000*vbat));% Istanbul çevrimi
gerekli batarya gucu (rekuperasyon hariç)

%%% Istanbul SOC Durumu %%%

SOC1(1)=((Qbat-(Pb_ist(1)/3600))/Qbat)*0.8*100;% rekuperasyon dahil
for x=2:length(vs_ist);
SOC1(x)=(((Qbat*SOC1(x-1)/80)-(Pb_ist(x-1)/3600))/(Qbat*SOC1(x-
1)/80))*SOC1(x-1);
end
subplot(3,2,5)
plot(SOC1)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('SOC (%)'); title('Istanbul
Test Çevrimi Sarj Durumu');

SOC12(1)=((Qbat-(Pb2_ist(1)/3600))/Qbat)*0.8*100;% rekuperasyon
hariç
for x=2:length(vs_ist);
SOC12(x)=(((Qbat*SOC12(x-1)/80)-(Pb2_ist(x-1)/3600))/(Qbat*SOC12(x-
1)/80))*SOC12(x-1);
end

Vb_ist=(-16.8109*(SOC1/100).^5+37.3296*(SOC1/100).^4-
24.315*(SOC1/100).^3+1.8055*(SOC1/100).^2+3.0674*(SOC1/100)+2.1199)*
Sh*(Sm/2);% Istanbul çevrimi batarya voltajı değisimi
Vb_ist=Vb_ist';

for nn=1:length(vs_ist);% IDC Çevrimi İç direnç değisimi
for mm=1:length(SOC1);
if Pb_ist(nn)>0;
Ri_ist(nn)=10.1791.*(SOC1(mm)./100).^6-
31.8588.*(SOC1(mm)./100).^5+38.6412.*(SOC1(mm)./100).^4-
23.0181.*(SOC1(mm)./100).^3+7.0614.*(SOC1(mm)./100).^2-
1.071.*(SOC1(mm)./100)+0.071;
else
Ri_ist(nn)=-
0.3306.*(SOC1(mm)./100).^5+0.884.*(SOC1(mm)./100).^4-
0.8833.*(SOC1(mm)./100).^3+0.4181.*(SOC1(mm)./100).^2-
0.0955.*(SOC1(mm)./100)+0.0122;
end
end
end
Ri_ist=Ri_ist';

```

```

i_ist=(Vb_ist-sqrt(Vb_ist.^2-4.*Ri_ist.*Pb_ist.*1000))./(2*Ri_ist);%
Istanbul çevrimi batarya akimi degisimi

subplot(3,2,6)
plot(i_ist)
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel('Akim (A)'); title('Istanbul
Test Çevrimi Batarya Akimi');

% Çevrimlere göre SOC (rekuperasyonlu ve rekuperasyonsuz)
kar??la?t?rmas?
figure(9)
%NEDC
a=v_nedc';
b=SOCN;
c=SOCN2;
t=1:length(v_nedc);
subplot(3,1,1)
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(t,b,t,a);
hold on
plot(t,c,'r')
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel(haxes(1),'SOC
(%)'),ylabel(haxes(2),'Tasit Hizi (km/h)');
title('NEDC Test Çevrimi Sarj Durumu');
%FTP-72
a=v_ftp72';
b=SOCF;
c=SOCF2;
t=1:length(v_ftp72);
subplot(3,1,2)
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(t,b,t,a);
hold on
plot(t,c,'r')
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel(haxes(1),'SOC
(%)'),ylabel(haxes(2),'Tasit Hizi (km/h)');
title('FTP-72 Test Çevrimi Sarj Durumu');
%IDC
a=v_ist';
b=SOCI;
c=SOCI2;
t=1:length(v_ist);
subplot(3,1,3)
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(t,b,t,a);
hold on
plot(t,c,'r')
xlabel('Çevrim Süresi (s)'),ylabel(haxes(1),'SOC
(%)'),ylabel(haxes(2),'Tasit Hizi (km/h)');
title('IDC Test Çevrimi Sarj Durumu');

```